
Die Ermittlung einer Bewertungsskala für das Griffigkeitsmesssystem GripTester unter Berücksichtigung der Bewertungsskala des SKM

Dipl.-Ing. Peter Weidich

geboren in Jena



Fachgebiet Straßenwesen
mit Versuchsanstalt

Prof. Dr.-Ing. J. Stefan Bald

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt zur
Erlangung des akademischen Grades eines Dokotor-Ingenieurs genehmigte Dissertation

Referent: Prof.-Dr.-Ing. J. Stefan Bald

Korreferent: Prof.-Dr.-Ing. Martin Radenberg

Korreferent: Prof.-Dr.-Ing. Dr.-Ing.E.h. Hans-Georg Retzko

Tag der Einreichung: 27.05.2009

Tag der mündlichen Prüfung: 28.09.2009



Summary

The friction of roads is a test statistic that can be described by various kinds of test methods. These test methods often base on different measuring principles. The aim of friction measuring is to provide an assessment of the quality of road sections. To check the quality of these sections, the measuring results must be compared with prescriptive limits. Are these measuring results higher than the limits, the quality of the road section is good. Are the measuring results lower than the limits, the quality of the section is bad.

In the majority of cases, various testing methods lead to different results. If there is only one list of prescriptive limits, the assessment of these various testing methods is not equal.

The test methods Seitenkraftmesser (SKM) and GripTester are in the focus of this work.

The SKM method has already got prescriptive limits. But there are no final prescriptive limits for the GripTester method. The aim of this work is to develop prescriptive limits for the GripTester which do not contradict those results gained by the SKM method.

A calibration line describes the technical correlation between the inspection characteristics of both, SKM and GripTester. By means of this calibration line, the prescriptive limits of the SKM can be transformed to those of the GripTester. The evaluation of the calibration line is based on a harmonized database of different measuring campaigns.

In the first step, a model of data harmonization has been developed. The data base has been split into classes of elements with equal characteristics. For these classes specific calibration lines have been calculated. But none of these calibration lines may describe the technical combination completely. Measure point variances round the calibration line have been detected. The reason for these variances partly lies in the method of combining the inspection characteristics. The variances are the result of both systems, the SKM and the GripTester. But there are fixed standards for the prescriptive limits for the SKM method. Therefore the variances in the prescriptive limits of the GripTester have to be considered.

For a proved assessment by the GripTester, the prescriptive limits with the variances between SKM and GripTester must be increased. This is, the prescriptive limits of the GripTester must be higher than those of the SKM.

As a result of this work, prescriptive limits for the GripTester have been defined.

Is the measuring result higher than the prescriptive limit, the quality of the road section is good. Has the quality been measured by the GripTester, it is most likely that the SKM reports a good quality too. But when the GripTester reports a bad result, it is not possible to conclude the SKM quality assessment.

Zusammenfassung

Griffigkeit ist eine Prüfgröße, die mit unterschiedlichen Prüfverfahren beschrieben werden kann. Die Prüfverfahren basieren oft auf unterschiedlichen Prüfprinzipien. Zur Beurteilung der Griffigkeit wird die sichere Überschreitung des Messergebnisses zu einem vorgegebenen Grenzwert geprüft. Bei Überschreitung wird die Qualität mit „gut“ beurteilt, bei Unterschreitung wird die Qualität mit „schlecht“ beurteilt.

Wird ein Messobjekt mit unterschiedlichen Prüfprinzipien unter Vergleichsbedingungen gemessen, so werden nicht identische Messergebnisse erwartet.

In dieser Arbeit werden näher das Prüfverfahren Seitenkraftmesser (SKM) und GripTester untersucht.

Für das Prüfverfahren SKM sind bereits Grenzwerte formuliert. Für das Prüfverfahren GripTester konnten bisher noch keine endgültigen Grenzwerte festgelegt werden. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, Grenzwerte für das Prüfverfahren GripTester festzulegen, die einer Beurteilung mit dem SKM nicht widersprechen.

Der technische Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen des SKM und des GripTesters wird durch die Kalibrierlinie beschrieben. Mit den Kalibrierlinien können die Grenzwerte der SKM auf den GripTester übertragen werden. Zur Ermittlung der Kalibrierlinie wurde zunächst ein Modell geschaffen, um vorhandene vergleichende Messungen zu einer homogenen Datenbasis zusammenzufassen.

Die Datenbasis wurde in Klassen ähnlicher Elemente geteilt um an ihnen spezifische Kalibrierlinien zu entwickeln. Die Kalibrierlinien können den Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen nicht vollständig beschreiben. Es werden zwischen den Messwerten und den Kalibrierlinien Reststreuungen beobachtet. Diese Reststreuungen haben ihre Ursache im gewählten Verfahrensvergleich und sind beiden Prüfverfahren zugeordnet. Da die Grenzwerte für das Prüfverfahren bereits festgelegt sind, müssen die Reststreuungen bei den Grenzwerten des GripTester berücksichtigt werden.

Für eine gesicherte Beurteilung auf Überschreitung einer vorgegebenen Grenze wurden die Grenzwerte für den GripTester um ein Maß, welches die Reststreuung berücksichtigt, erhöht.

Im Ergebnis dieser Arbeit werden Grenzwerte für den GripTester definiert. Bei Überschreitung dieser Grenzwerte wird die Qualität mit „gut“ beurteilt. Bei Überschreitung der Grenzwerte für den GripTester folgt im statistischen Mittel eine Überschreitung der Grenzwerte für den SKM mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit. Bei Unterschreitung der Grenzwerte für den GripTester ist jedoch keine gesicherte Beurteilung im Verhältnis zum SKM möglich.

Vorwort

Der Gedanke zur vorliegenden Arbeit reifte während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt der Technischen Universität Darmstadt (TUD). In dieser Zeit beschäftigte ich mich mit Projekten zur Messung und Bewertung der Straßengriffigkeit und sah dort Ansätze für weitere Forschungen.

Die gerätetechnische Ausstattung der TUD mit einem eigenen Griffigkeitsmesssystem (GripTester) gab mir die Möglichkeit zu eigenbezogenen Untersuchungen und bot mir so den Raum bekanntes Wissen zu verifizieren und neue Erkenntnisse zu sammeln.

In diesem Zusammenhang möchte ich besonders Herrn Professor Dr.-Ing. J. Stefan Bald danken. In den gemeinsamen Gesprächen eröffnete er mir neue Sichtweisen und half mir, komplexe Zusammenhänge in ihrer Struktur zu erkennen und in Modellen zu beschreiben. Er gab mir damit zahlreiche Denkanstöße, die meine Arbeit vorantrieben und die ich umzusetzen versucht habe. Besondere Unterstützung habe ich auch von Herrn Dr. rer. nat. Tilmann Deutler (Universität Mannheim) erfahren dürfen. In unseren Gesprächen machte er mir deutlich, wie wichtig die korrekte Beschreibung von Beobachtungen der Realität in mathematischen Modellen ist. Er unterstützte mich zu jeder Zeit mit Rat und Tat und bot mir die Möglichkeit, in das Denkgerüst der induktiven Statistik tiefer einzudringen, die einen wesentlichen Teil dieser Arbeit ausmacht. Für diese Zusammenarbeit möchte ich ihm herzlich danken. Herrn Professor Dr.-Ing. H.-G. Retzko danke ich vielfach für seine fachliche Unterstützung meiner Arbeit und sein stets aufmunterndes Interesse am Verlauf der Dinge. Das hat mir außerordentlich geholfen.

Zu danken habe ich auch meinen ehemaligen KollegInnen an der Technischen Universität Darmstadt, die für mich immer ein offenes Ohr hatten und nicht müde wurden, sich mit meinen oft sehr theoretischen Überlegungen auseinander zu setzen und meiner Arbeit mit Interesse folgten. Besonderer Dank gilt dabei Verena Rosauer. Nicht zuletzt möchte ich meiner Familie danken, die mich zu jedem Zeitpunkt unterstützte und viel Verständnis für den zeitlichen Rahmen zeigte, die meine Dissertationsschrift in Anspruch nahm.

Jena, im Mai 2009

Inhaltsverzeichnis

	Seite
Summary	A
Zusammenfassung	B
Vorwort	C
Inhaltsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	8
Abbildungsverzeichnis	10
Abkürzungsverzeichnis	12
Symbolverzeichnis	13
1 Einleitung	16
2 Stand des Wissens	18
2.1 Begriffliche Eingrenzung der Griffigkeit	18
2.2 Ermittlung des Griffigkeitswertes	18
2.2.1 Statistisches Modell zur Bestimmung des Griffigkeitswertes	19
2.2.2 Verfahren zur Bestimmung des Griffigkeitswertes	23
2.3 Griffigkeit und Unfälle	26
2.3.1 Modelle im Allgemeinen	26
2.3.2 Modelle zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Griffigkeit und Unfällen	26
2.3.3 Notwendigkeit von Mindestgriffigkeitswerten	31
2.3.4 Notwendigkeit von Anforderungswerten für die Griffigkeit	32
2.4 Bewertung von Griffigkeitswerten und praktischer Umgang mit Anforderungswerten	32
2.4.1 Bewertungshintergrund der SCRIM in Deutschland	33
2.4.2 Beurteilung von Griffigkeitswerten in Deutschland - vorläufiger Bewertungshintergrund des GripTesters der TUD	37
2.4.3 Praktischer Umgang mit Anforderungswerten	37
2.5 Vergleich von Messwerten unterschiedlicher Prüfverfahren	39
2.5.1 Allgemeine Erläuterungen	39
2.5.2 Modelle zum Vergleich unterschiedlicher Prüfverfahren	40
2.5.3 Spezifische Modelle zum Vergleich der Prüfverfahren SCRIM und GripTester	44
2.5.4 Abgeleitete Lösungsstrategie	45
3 Methodik und Durchführung	46
3.1 Fachlich methodisches Vorgehen -Strategie-	46
3.2 Ermittlung einer Datenbasis für die Ermittlung von Kalibrierlinien	49
3.2.1 Vorhandenes Datenmaterial aus Vergleichsuntersuchungen	49

3.2.2	Datenaufbereitung und Klassendefinition	51
3.3	Ermittlung von Kalibrierlinien als technischer Zusammenhang zwischen zwei Prüfmerkmalen	74
3.3.1	Wahl einer Zusammenhangshypothese zwischen den Prüfmerkmalen X und Y	75
3.3.2	Fehler-in-den-Variablen Modell für lineare Ansätze	82
3.3.3	FV - Modell für einen nicht linearen Ansatz	87
3.3.4	Methodik zur Prüfung der Verwendbarkeit ermittelter Zusammenhänge	87
3.3.5	Prüfung der Verwendbarkeit ermittelter Zusammenhänge	95
3.3.6	Festlegung der ermittelten Kalibrierlinien	99
3.4	Transformation der Anforderungswerte	99
3.4.1	Verfahren zur Übertragung der Anforderungswerte vom Prüfmerkmal X auf das Prüfmerkmal Y	100
3.4.2	Ermittlung der statistischen Grundlagen für die Übertragung der Anforderungswerte	110
3.4.3	Umsetzung der Transformation der Anforderungswerte von SCRIM auf GripTester	111
3.5	Formulierung des Bewertungssystems GripTester	119
3.5.1	Allgemeine Anforderungen an das Bewertungssystem GripTester	120
3.5.2	Überprüfung auf Gleichheit in der Beurteilung von Messobjekten durch beide Prüfverfahren	121
3.5.3	Spezifische Forderungen an das Bewertungssystem GripTester	123
3.5.4	Formulierung der Umrechnung GripTester → SCRIM	124
3.5.5	Formulierung der Anforderungswerte für den GripTester, Betrachtung der Abweichungen	126
3.5.6	Festlegung der Anforderungswerte an das Bewertungssystem GripTester	133
3.5.7	Annahme- und Rückweisewahrscheinlichkeit des Bewertungssystems GripTester	134
4	Zusammenfassung	139
5	Ausblick	144
	Anlagenverzeichnis	147
	Literaturverzeichnis	150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zustandswerte der Normierungsfunktion für die Griffigkeit mit dem Messverfahren SCRIM nach M BGriff 2003	36
Tabelle 2:	Grenzwerte für die Beurteilung der Griffigkeit im Bauvertrag nach ZTV Asphalt-StB 01 korrigiert durch ARS 24/2003	37
Tabelle 3:	Regressionsparameter a und b für die Beschreibung der Textur verschiedener Untersuchungen	40
Tabelle 4:	Übersicht zu den vorliegenden vergleichenden Untersuchungen zwischen SCRIM und GripTester zusammen mit messbegleitenden Informationen	50
Tabelle 5:	Aus Ringversuchen ermittelte Standardabweichung unter Wiederholbedingungen für SCRIM und GripTester für $m = 2$	60
Tabelle 6:	Mittlere Standardabweichung unter Vergleichbedingungen für SCRIM und GripTester	61
Tabelle 7:	Mittlere Standardabweichung zwischen den Prüfstellen für SCRIM und GripTester	61
Tabelle 8:	Übersicht zu den Einflüssen und Streuungen vorhandener Untersuchungen und die resultierende Streuungen für GripTester und SCRIM	64
Tabelle 9:	Ermittlung der Punktgewichte	67
Tabelle 10:	Untersuchte Fälle der Datenbetrachtung mit und ohne Datenwichtung	68
Tabelle 11:	Gruppierungskriterien für Messdaten	72
Tabelle 12:	Gebildete Gruppen für die Untersuchung auf signifikante Unterschiede	73
Tabelle 13:	Varianten der Untersuchung auf signifikante Unterschiede (A-Asphalt, B-Beton, o-offen, m-mittel, g-geschlossen)	96
Tabelle 14:	Zuordnung der Quantilwerte zu Perzentilen für das Messverfahren SCRIM auf der Grundlage des Bewertungshintergrundes nach BECKER 1992, M BGriff, ZTV Asphalt-StB und ZTV –Beton-StB	111
Tabelle 15:	Übertragene Anforderungswerte für den GripTester für einen Zustandswert von 1,5 nach Anlage A13.2, linearer geschwindigkeitsspezifischer Ansatz, Verfahren A	116
Tabelle 16:	Übertragene Anforderungswerte für den GripTester für einen Zustandswert von 4,5 nach Anlage A13.2, linearer geschwindigkeitsspezifischer Ansatz, Verfahren A	116
Tabelle 17:	Streuung der Abweichungen zur Regressionsgeraden in Abhängigkeit von der Ableserichtung	125
Tabelle 18:	Ermittlung der Streuung des Modellfehlers σ_e	127
Tabelle 19:	Sicherheitszuschlag infolge des Modellfehlers	128
Tabelle 20:	Anforderungswerte im Bewertungssystem GripTester	134
Tabelle 21:	Häufigkeit der Ereigniskombinationen, unterschieden nach Geschwindigkeitsklassen	136
Tabelle 22:	Summe des Auftretens der Ereigniskombinationen unabhängig von den Geschwindigkeitsklassen	136

Tabelle 23:	Ermittlung der Ereignisanzahl	138
Tabelle 24:	Ermittlung der bedingten Wahrscheinlichkeiten	138

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Seitenkraft am schräg gestellten SCRIM-Rad, Köhler 1993	23
Abbildung 2:	links: SCRIM-Rad mit Bewässerungseinrichtung, DAV 2001; rechts: Lage der Messlinie im Bezug auf die Seitenrandmarkierung, MECHATRONIC	24
Abbildung 3:	links: GripTester, Ansicht von unten, rechts: Zugfahrzeug mit GripTester der TUD	24
Abbildung 4:	Zusammenhang zwischen Griffigkeitswert und Anteil der Unfälle bei Nässe, dargestellt durch gewogene Gruppenmittel und zugehörige Standardabweichungen, SCHULZE 1975	28
Abbildung 5:	Signifikante Zusammenhänge für Außerorts-Unfälle nach HIERSCHE 1990	29
Abbildung 6:	Darstellung zweier Streckenabschnitte mit signifikant unterschiedlicher Griffigkeit, MECHATRONIC AG	31
Abbildung 7:	BWH der SCRIM als Verteilung von Griffigkeitswerten im Netz 1992	33
Abbildung 8:	Normierungsfunktionen für die Griffigkeit nach AP 9/A1 zur ZEB 2001	35
Abbildung 9:	Auswerteschema	48
Abbildung 10:	Splittung der messbegleitenden Informationen in Informationen zur Einschätzung der Zuverlässigkeit und Informationen zur Gruppenbildung	52
Abbildung 11:	Darstellung eines hypothetischen Griffigkeitsverlaufs quer zur Mess- und Fahrtrichtung	55
Abbildung 12:	Bildung von Punkten aus Messergebnissen und Standardabweichungen	65
Abbildung 13:	Bildung des Punktgewichtes und Verwendung in der Korrelationsbetrachtung	66
Abbildung 14:	Messwertpaare ($x_{sc, i}$, $x_{GT, i}$) nach Wichtung	67
Abbildung 15:	Linearer Zusammenhang zwischen den 100m-Mittelwerten der SCRIM und des GripTesters für gewichtete Daten	69
Abbildung 16:	Verteilung der nicht erklärten Reststreuungen $\varepsilon_i + w_i$ für den linearen Ansatz	70
Abbildung 17:	Überprüfung der transformierten Residuen auf Normalverteilung	70
Abbildung 18:	Klassen- bzw. Gruppenbildung	71
Abbildung 19:	Zusammenhang zwischen den Messwerten x_i , y_i und den wahren Werten ξ_i , η_i , DEUTLER 2002	76
Abbildung 20:	Darstellung zur der Kleinste-Quadrate-Methode (KQM), DEUTLER 2002	77
Abbildung 21:	Korrelationsellipse der prüfbedingten Abweichungen nach DEUTLER 2002	80
Abbildung 22:	Modellfehler ε bei Diskrepanz zwischen der gewählten Kalibrierlinie und dem tatsächlichen technischen Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen ξ und η nach DEUTLER 2002	81

Abbildung 23: Lage der Regressionsgeraden und der zugehörigen Kalibriergeraden, DEUTLER 2002	90
Abbildung 24: Signifikanzuntersuchung und anschließende Neugruppierung der Daten	97
Abbildung 25: Lage eines Datenpunktes zu den Entscheidungsquadranten	102
Abbildung 26: Schlechtanteile bei zweidimensionaler Normalverteilung, DEUTLER 2002	104
Abbildung 27: Bestimmung des Quantilwertes Q_y aus dem Quantilwert Q_x bei geforderter Gleichheit der Schlechtanteile $p_{x, \max}$ und $p_{y, \max}$ für den Grenzfall gerade noch akzeptabler Qualität, DEUTLER 2002	106
Abbildung 28: Zusammenhang zwischen p_x und p_y nach links: Verfahren A und rechts: Verfahren B, DEUTLER 2002	107
Abbildung 29: Relation zwischen den Schlechtanteilen p_x und p_ξ bei Gleichheit der Quantile, DEUTLER 2002	108
Abbildung 30: Vergleich der Kalibrierlinien mit den Anforderungswerten aus dem BWH des GripTesters für 40 km/h ohne Gleichheit der Schlechtanteile, Verfahren A	113
Abbildung 31: Transformation der Anforderungswerte der SCRIM auf den GripTester	115
Abbildung 32: Vereinbarung einer geschwindigkeitsunabhängigen Transformationsgleichung als Schlussfolgerung aus der Plausibilitätsüberprüfung	117
Abbildung 33: Verhältnis der Datenmenge A zur Datenmenge B	118
Abbildung 34: Mögliche Konstellationen der Datenmenge B zur Datenmenge C	118
Abbildung 35: Menge aller verfügbaren Griffigkeitsmesswerte (Menge A) im Verhältnis zu den Griffigkeitsmesswerten im Netz	119
Abbildung 36: Gegenüberstellung der Messwertränge zwischen GripTester und SCRIM	122
Abbildung 37: Relation zwischen Anforderungsgrenze, wahren Wert und Messergebnis im Fall der ‚gerade noch‘ Erfüllung	131
Abbildung 38: Beurteilung eines konkreten Messgegenstandes nach unterschiedlichen Prüfprinzipien	143

Abkürzungsverzeichnis

ARS	Allgemeines Rundschreiben Straßenbau
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
BMVBW	Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen
BWH	Bewertungshintergrund
CEN	European Committee for Standardization
DAV	Deutscher Asphaltverband
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN ISO	International Organization for Standardization
EFI	European Friction Index
EU	Europäische Union
FEHRL	Forum of European National Highway Research Laboratories
GN	GripNumber (Ablesewert beim GripTester)
IFI	International Friction Index
Mio.	Millionen
MPD	Mean Profile Depth
MTD	Mean Texture Depth
RAS – L	Richtlinie für die Anlage von Straßen, Teil: Linienführung
RV	Ringversuch
SC	SCRIM
SCRIM	Sideway-force Coefficient Routine Investigation Machine
SFS	Spurführungssystem
SKM	Seitenkraftmesser
SRM	Stuttgarter Reibungsmesser
SRT	Skid Resistance Tester
SV	Schwerverkehr
VM	Vergleichsmessungen
VU	Vergleichsuntersuchungen
VV	Vergleichsversuche
ZEB	Zustandserfassung und -bewertung
ZTV	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen

Die Anlagen sind mit einem **A** gekennzeichnet und wurden für die verbesserte Lesbarkeit vom Hauptdokument getrennt. Die Anlagen befinden sich im Anlagendokument.

Symbolverzeichnis

$A; B$	Gerätekorrekturfaktoren im IFI - Modell
$a; b$	Regressionskoeffizienten in der Griffigkeits–Texturabhängigkeit, Regressionsglieder der geschätzten Kalibrierlinie
$a_0; b_0$	Schätzwerte für die Glieder in der Kalibrierlinie (linearer Ansatz)
$\alpha; \beta$	Parameter der tatsächlichen Kalibrierlinie (linearer Ansatz)
β_0, β_1	Koeffizienten eines nicht linearen Ansatzes als Kalibrierlinie
β_{KQ}	lineares Regressionsglied der Regressionsgerade nach der „Kleinste Quadrat Methode“
c_i	Temperaturzuwachs
d	Schätzwert für das Glied in der Kalibrierlinie (proportionaler Ansatz)
δ	Parameter der tatsächlichen Kalibrierlinie (proportionaler Ansatz)
Δt	Zeitabschnitt
$\Delta s_g^2; \Delta s_u^2; \Delta s_T^2$	Zuwachs der empirischen Varianz
Θ	Verhältnis der Prüffehlervarianzen
ε_i	Modellabweichungen an der Stelle i
η	wahrer unbekannter Wert des Prüfmerkmals Y
f	Regressionsfunktion mit Y als abhängiges und X als unabhängiges Merkmal
f_1, f_2	Freiheitsgrade in Signifikanzuntersuchung
F_{60}	mit Gerätekorrekturfaktoren A, B korrigierter Messwert im IFI - Modell
FR_{60}	gerätespezifischer Messwert auf 60 km/h transformiert im IFI - Modell
FR_S	Messwert im IFI - Modell
Φ	Verteilungsfunktion der Normalverteilung
g	Regressionsfunktion mit X als abhängiges und Y als unabhängiges Merkmal
g_k	Reziprokwert der empirischen Streuung
G_k	Punktgewicht
$GF(S)$	Bezugsgröße im IFI – Modell (richtiger Wert)
$G_x; G_y$	Grenzwerte für das Prüfmerkmal X und Y
$G_{\xi, \min}; G_{\eta, \min}$	untere Grenzen der wahren Werte für die Prüfmerkmale X und Y
$G_{x, \min}; G_{y, \min}$	untere Grenzen für die Messwerte der Prüfmerkmale X und Y
$h_A; h_B$	Funktionen über den Zusammenhang der Schlechtanteile nach Lösungsmöglichkeiten A und B
$k_x; k_y$	Abnahmefaktor für die Prüfpläne
λ_i	über Kalibrierlinie transformierte Werte des Prüfmerkmals X
m	Anzahl der Messwerte je Messergebnis
$m_{V,T}$	geschwindigkeits- und temperaturkorrigierter Messwert

m_v	geschwindigkeitskorrigierter Messwert
μ_{GT}	Griffigkeitsmesswerte des GripTesters
μ_{SC}	Griffigkeitsmesswerte der SCRIM
my^* ; my^{**}	Griffigkeitsmesswerte variabler, temporär definierter Bedeutung
μ_v ; μ_w	Erwartungswerte der Abweichungen
μ_x ; μ_y	Erwartungswerte der Messwerte des Prüfmerkmale X und Y
μ_ξ ; μ_η	Erwartungswerte der wahren, unbekannten Werte
μ_x^Q	zum maximal zulässigen Schlechtanteil gehöriger Erwartungswert
N_1 , N_2	Stichprobenumfang der Stichprobe 1 bzw. 2
ω_i	Fehlersumme aus Modellfehler ε und prüfbedingten Abweichungen w
ρ_{vw}	Korrelationskoeffizient zwischen prüfbedingten Abweichungen v und w
$\rho_{v\varepsilon}$	Korrelationskoeffizient zwischen prüfbedingten Abweichungen v und Modellfehler ε
$\rho_{w\varepsilon}$	Korrelationskoeffizient zwischen prüfbedingten Abweichungen w und Modellfehler ε
$\rho_{SF, T}$	Korrelationskoeffizient zwischen anderen Einflüssen und Temperatureinfluss
p_x ; p_y	Schlechtanteile für die Prüfmerkmale X und Y
$p_{x, \min}$; $p_{y, \min}$	minimal zulässige Schlechtanteile der Prüfmerkmale X bzw. Y
$p_{x, \max}$; $p_{y, \max}$	maximal zulässige Schlechtanteile der Prüfmerkmale X bzw. Y
Q_x ; Q_y	Quantilwert zum Schlechtanteil p_x bzw. p_y
$Q_{x, \min}$; $Q_{y, \min}$	minimale Quantilwerte der Prüfmerkmale X bzw. Y
$Q_{x, \max}$; $Q_{y, \max}$	maximale Quantilwerte der Prüfmerkmale X bzw. Y
q	Anzahl der Prüfstellen (Prüfgeräte)
R	Korrelationskoeffizient
r_{ij}	j-ter Rang des Messwertes x_i
p_{ik}	k-ter Rang des Messwertes y_i
s_x^2 ; s_y^2	empirische Varianzen der Prüfmerkmale X bzw. Y
s_{xy}^2	empirische Kovarianz der Prüfmerkmale X und Y
s_k^2	zusammengesetzte empirische Varianz der Datenpunkte
s_ε^2	empirische Varianz der Modellfehler
s_w^2 ; s_v^2	empirische Varianz der prüfbedingten Abweichungen unter Vergleichbedingungen
s_d^2	empirische Varianz des linearen Gliedes im proportionalen Ansatz
s_ω^2	empirische Varianz der Summe aus prüfbedingten Abweichungen w und Modellfehler ε
$s_{r,SC}^2$; $s_{r,GT}^2$	empirische Varianzen unter Wiederholbedingungen der SCRIM bzw. des GripTesters
$s_{R,SC}^2$; $s_{R,GT}^2$	empirische Varianzen unter Vergleichbedingungen der SCRIM bzw. des GripTesters
$s_{L,SC}^2$; $s_{L,GT}^2$	empirische Prüfstellenvarianzen unter Vergleichbedingungen der SCRIM bzw. des GripTesters
s_L^2	empirische Prüfstellenvarianz unter Vergleichbedingungen
$s_{L,q}^2$	empirische Prüfstellenvarianz unter Vergleichbedingungen von q Prüfstellen

σ_r^2	Prüfvarianz unter Wiederholbedingungen (allgemein)
σ_R^2	Prüfvarianz unter Vergleichbedingungen (allgemein)
$\sigma_v^2; \sigma_w^2$	Varianz der prüfbedingten Abweichungen
$\sigma_G^2; \sigma_\omega^2$	Varianz der Summe aus prüfbedingten Abweichungen w und Modellfehler ε
$\sigma_M^2; \sigma_\varepsilon^2$	Varianz der Modellfehler
$\sigma_x^2; \sigma_y^2$	Varianz der Prüfmerkmale
σ_{xy}^2	Kovarianz der Prüfmerkmale X und Y
σ_d^2	Varianz des linearen Koeffizienten im proportionalen Modellansatz
$\sigma_{R,u}^2$	Varianz unter Vergleichbedingungen ungeführter Fahrten
$\sigma_{R,g}^2$	Varianz unter Vergleichbedingungen geführter Fahrten
$\sigma_{\bar{x}}^2$	Varianz der Mittelwerte der Prüfmerkmals X
ξ	wahrer unbekannter Wert des Prüfmerkmals X
T_{Fb}	Fahrbahnoberflächentemperatur in °C
$t_{SC,i}; t_{GT,I}$	Temperaturkorrekturglieder
V_p	Größe zur Berücksichtigung des Einflusses der Textur auf den Griffigkeitsmesswert im IFI - Modell
$v_i; w_i$	prüfbedingte Abweichungen zwischen wahren Werten und Messwerten an der Stelle i
X	Prüfmerkmal
x	Ausprägung des Prüfmerkmals
x_i	i-te Ausprägung des Prüfmerkmals X bzw. Ausprägung an der i-ten Stelle
\bar{x}	Mittelwert beim Prüfmerkmal X
Y	Prüfmerkmal
y	Ausprägung des Prüfmerkmals
y_i	i-te Ausprägung des Prüfmerkmals Y oder Ausprägung an der i-ten Stelle
\bar{y}	Mittelwert beim Prüfmerkmal Y
z^Q	Prüfgröße des Variablenprüfplans

1 Einleitung

Der Inhalt dieser Dissertationsschrift beschäftigt sich mit dem Vergleich von Messwerten der Prüfverfahren GripTester und SCRIM (jetzt SKM) mit der Zielstellung, das Bewertungssystem des GripTesters auf das Bewertungssystem der SCRIM abzustimmen und somit beide Verfahren zur Qualitätsüberprüfung einsetzen zu können.

Zur Verwendung des Begriffs SCRIM sei für diese Arbeit Folgendes gesagt:

Das Prüfverfahren SCRIM ist ein eingetragenes Warenzeichen. Das Prüfverfahren SCRIM ist dem Prüfprinzip nach ein Seitenkraftmessverfahren (SKM). Das Verfahren wird nunmehr in Deutschland als SKM bezeichnet. Diese Arbeit folgt in der begrifflichen Verwendung noch der alten Namensgebung, da sie noch vor der Umbenennung begonnen wurde. Die Ergebnisse dieser Arbeit sind im technischen Sinne auf das Messverfahren SKM übertragbar.

Die Arbeit konzentriert sich im ersten Schritt auf die Forschungsergebnisse der vergangenen Jahre auf dem Gebiet der Griffigkeit als Unfallursache. Hier wurden bereits zahlreiche Versuche unternommen einen Zusammenhang zwischen dem Griffigkeitsmesswert und den Unfallkennzahlen herzustellen. Anhand dieser Erkenntnisse wird die Prüfgröße Griffigkeit und die Prüfverfahren als Mittel zur Zustandsbeschreibung mit ihren Vor- und Nachteilen diskutiert.

Im nächsten Schritt wendet sich die Arbeit den internationalen Untersuchungen zum Vergleich von Griffigkeitsmessverfahren zu. Hier wurden bereits in den letzten 30 Jahren unterschiedliche Modelle zum Messwertvergleich entwickelt. Während jedoch diese Untersuchungen auf die Messwertharmonisierung abzielen, geht die vorliegende Arbeit einen anderen Weg. Im Mittelpunkt der Betrachtung steht nicht die Gleichheit des Messergebnisses, sondern die Übereinstimmung der anschließenden Beurteilung der Messergebnisse durch beide Prüfverfahren.

Dazu wurde eine Lösungsstrategie entworfen, die eine bestimmte, modellhafte Sichtweise auf die Griffigkeitsmessungen voraussetzt. Aus den Ergebnissen vorhandener, vergleichender Untersuchungen zwischen GripTester und SCRIM wurde eine homogene Datenbasis entworfen. An dieser Datenbasis wurden die Zusammenhangsfunktionen zwischen den Prüfmerkmalen entwickelt. Die Erkenntnisse der internationalen, vergleichenden Untersuchungen wurden daran kritisch diskutiert.

Das methodische Vorgehen dieser Arbeit berücksichtigte die inhaltlichen Gedanken des Bewertungshintergrundes der SCRIM. Deshalb bestand ein wesentlicher Teil der Arbeit darin, den Bewertungshintergrund der SCRIM und die Formulierung ihre Anforderungswerte zu analysieren.

Mit Klärung der Datenbasis und der Struktur des Bewertungshintergrundes SCRIM wurden im nächsten Schritt unterschiedliche, mathematische Verfahren zur Transformation der Anforderungswerte zwischen den beiden Merkmalen untersucht. Dabei zeigten sich Ergebnisse, die eine weitere Diskussion der Datenbasis notwendig macht.

Mit der Definition von Übertragungsfunktionen wurden Reststreuungen beobachtet, deren Ursachen nicht erklärbar waren. Die beobachteten Reststreuungen können jedoch in ihrer Größe als Varianz des Ergebnisses beschrieben werden. Über diese Beschreibung ist eine Berücksichtigung in den mathematischen Formeln bei der Transformation der Anforderungswerte möglich.

Diese entstandenen Anforderungswerte wurden so festgelegt, dass der GripTester als alternatives Verfahren zur SCRIM verwendet werden kann. Aus der ‚positiven‘ Bewertung eines Abschnittes mit dem GripTester folgt mit hoher Wahrscheinlichkeit die ‚positive‘ Bewertung mit der SCRIM. Gleichzeitig wurden die Funktionen entwickelt, um eine Transformation des SCRIM-Messwertes auf den GripTester-Messwert und umgekehrt zu ermöglichen.

Es zeigte sich während der Arbeit, dass ein Modell zur Übertragung von Anforderungswerten kein „linienhaft-homogenes“ Gebilde ist. Oft wurden Annahmen und Hypothesen neu formuliert, da sie im Zuge der Bearbeitung verworfen werden mussten. Da Griffigkeiten nicht unter Laborbedingungen ermittelt werden, waren weitere Modellannahmen möglich.

Textstellen, an denen wesentliche Annahmen in dieser Arbeit getroffen werden, sind mit dem Symbol $\{\Delta M\}$ gekennzeichnet. So werden die Randbedingungen der hier vorgestellte Methodik visuell unterstützt und fordern dazu auf, kritisch hinterfragt zu werden. Eingeführte Definitionen werden mit dem Symbol \blacktriangledown gekennzeichnet.

2 Stand des Wissens

2.1 Begriffliche Eingrenzung der Griffigkeit

Der Begriff Griffigkeit ist zunächst sehr abstrakt und wird im Sprachgebrauch unterschiedlich verwendet. So wird im allgemeinen Begriffsverständnis unter der **Griffigkeit** die Eigenschaft der Straßenoberfläche verstanden, welche die Möglichkeiten zur Kraftübertragung zwischen Straße und Fahrzeug bezeichnet. Der Begriff Griffigkeit bezieht sich damit konkret auf die Reibung zwischen Fahrbahn und Fahrzeugreifen.

Nach TP GRIFF STB (SCRIM), AUSGABE 2001 ist die Definition:

▼ Die Griffigkeit kennzeichnet die Wirkung der Rauheit und der stofflichen Beschaffenheit der Fahrbahnoberfläche auf den Reibungswiderstand des Fahrzeugreifens unter festgelegten Bedingungen.

Erweitert wird die Begriffsdefinition Griffigkeit um den Begriff des Griffigkeitswertes (besser Griffigkeitsmesswertes).

Der **Griffigkeitsmesswert** ist das Ergebnis eines Prüfverfahrens auf einem konkreten Straßenabschnitt unter Einhaltung festgelegter Prüfbedingungen und Modellgrenzen. Die Begriffe Griffigkeit und Griffigkeitsmesswert werden oft synonym verwendet, haben jedoch inhaltlich einen unterschiedlichen Bezug. Der Griffigkeitsmesswert oder Griffigkeitswert (allgemein für Griffigkeitsmesswert bzw. Griffigkeitsmessergebnis) soll eine die Griffigkeit kennzeichnende Größe darstellen. Während der Griffigkeitsbegriff mehr oder weniger einen allgemeinen Zustand bezeichnet, stellt der Griffigkeitsmesswert einen messbaren Zustandswert unter konkreten Rahmenbedingungen dar.

Werden konkrete Zahlenwerte für die Griffigkeit verwendet, handelt es sich zumeist um Griffigkeitswerte. Wird in dieser Arbeit der Begriff Griffigkeit verwendet, dann ist der Griffigkeitswert gemeint. Die messtechnische Erfassung der Griffigkeit macht weitere Festlegungen/ Vereinbarungen zu dieser kennzeichnenden Größe notwendig. Diese werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

2.2 Ermittlung des Griffigkeitswertes

In den folgenden Abschnitten wird dargestellt, wie der Griffigkeitswert bestimmt wird. Als erstes werden die statistischen Modellgrenzen erläutert, innerhalb derer der Griffigkeitswert gültig ist. Anschließend werden kurz die hier interessierenden Prüfverfahren SCRIM und GripTester mit Hinweis auf den verfahrensspezifischen Charakter des Messwertes vorgestellt.

2.2.1 Statistisches Modell zur Bestimmung des Griffigkeitswertes

Zunächst sollen die allgemeinen Begriffe Messwert und Messergebnis erläutert werden, um sie später auf den Griffigkeitswert anzuwenden. Diese Begriffe sind auf Grundlage von DIN 55 350 Teil 13 und DIN ISO 5725-Teil 1 definiert.

▼ Die **Messwerte** sind die Ergebnisse der Messungen. Ein Messwert setzt sich zusammen aus Zahlenwert (Ablesewert) und Einheit beziehungsweise Dimension, beispielsweise aus dem Zahlenwert [2,5] und der Einheit [kg].

Der Begriff des **Messergebnisses** ist in seiner Bedeutung mehrfach belegt. In der Prüftechnik wird als Messergebnis der Messwert unter Angabe seiner Genauigkeitsgrenzen verstanden. Beispielsweise [(2,5 ± 0,3) kg]. Für die Ermittlung der Griffigkeit wird dem Begriff eine weitere Bedeutung gegeben. Das Messergebnis ist hier das arithmetische Mittel aus n ermittelten Messwerten. In der vorliegenden Arbeit wird dem letzteren Begriffsverständnis gefolgt.

Exkurs in die theoretischen Grundlagen einer messtechnischen Fehlerbetrachtung und die Bestimmung des richtigen Wertes

Bekanntlich sind alle Messwerte mit prüfbedingten Abweichungen (umgangssprachlich Prüffehlern) behaftet. Die Begriffe Abweichungen und Fehler werden in dieser Arbeit synonym verwendet. Die Prüffehler sind dafür ‚verantwortlich‘, dass mit Messungen der ‚wahre Wert der Griffigkeit‘ x_w nie ermittelt werden kann.

Die prüfbedingten Abweichungen setzen sich zusammen aus **systematischen Fehlern** und **zufälligen Fehlern**.

Dabei unterscheidet man bei den systematischen Fehlern nach der Erkennbarkeit der Ursache für die Abweichung die **bekannten systematischen Fehler (bsF)** und die **unbekannten systematischen Fehler (usF)**, BANTEL 2000.

$$x = x_w + \Delta_{usF} + \Delta_{bsF} + \Delta_z$$

Bei den systematischen Fehlern ist gemeinsam, dass sie bei Messung mit demselben Messgerät immer in gleicher Größe und Richtung auftreten.

Ist der systematische Fehler bekannt, ist um diesen Betrag der Messwert zu korrigieren. Die Korrektur führt zum **korrigierten Messwert x**.

Zufällige Fehler (zF) haben ihre Ursachen in zufällig schwankenden Einflüssen während der Messung. Sie sind weder von der Größe noch von der Richtung her bekannt. Das Zusammenwirken vieler kleiner, für sich unbestimmbarer Einflüsse führt zu einer

beobachtbaren Streuung. Die beobachtete Streuung folgt in der Regel der Normalverteilung. Als Maß dieser Streuung gilt dann die Standardabweichung.

Der ‚theoretische Messwert‘, das heißt der Messwert ohne prüfbedingte Abweichungen, gibt den **wahren Wert** des Prüfmerkmals an. Nach DIN ISO 55350 ist dieser der tatsächliche Merkmalswert unter den bei der Ermittlung herrschenden Bedingungen. Damit ist jedoch klar, dass der wahre Wert nie über eine messtechnische Bestimmung ermittelt werden kann.

Dieses Problem besteht auch bei Griffigkeitsmessungen. Für den wahren Wert wird deshalb ein messtechnisch bestimmbarer ‚Ersatzwert‘ eingeführt. Nach DIN ISO 55350 wird dieser Ersatzwert als **richtiger Wert** vereinbart.

{ ΔM } Sinnvoll ist die Definition des richtigen Wertes in der Nähe des wahren Wertes. Der richtige Wert wird als arithmetisches Mittel von Messwerten definiert, da der/ die Mittelwert(e) zwar wie die Messwerte um den wahren Wert streuen, aber deren Streuung insgesamt geringer ist (Tschebyschew-Ungleichung). Die Mittelwerte gelten als beste Schätzer für den wahren Wert.

Je höher die Anzahl der Messwerte ist, aus denen der Mittelwert bestimmt wird, desto geringer ist die Streuung des Mittelwertes. Damit wäre die Ermittlung eines Mittelwertes aus möglichst vielen, voneinander unabhängigen Messwiederholungen anzustreben.

Besonderheiten der Griffigkeitsermittlung bei der Bestimmung des richtigen Wertes

Derzeit wird bei allen Prüfverfahren der Griffigkeitsmesswert durch die kontaktbezogene Interaktion zwischen einem Messreifen und der Straßenoberfläche ermittelt. Dazu gleitet ein Messrad über die mit einem Wasserfilm benetzte Straßenoberfläche. Während dessen kommt es zu einer mechanischen Einwirkung auf Struktur und/ oder Material an der Oberfläche der Straße. Eine chemische Interaktion kann nicht ausgeschlossen werden.

Eine, wie bei Wiederholversuchen geforderte, Unveränderbarkeit des Messobjektes während der Messungen liegt damit zumindest theoretisch nicht vor. Der Versuch, um aus dem Mittelwert der Messwiederholungen einen möglichst genauen Schätzwert für den wahren Wert zu bekommen, scheitert an der konkreten Umsetzbarkeit.

Eine zu schnelle Messfolge bei Wiederholmessungen kann in Verbindung mit dem Restwasserfilm zu einer erhöhten Wasserfilmdicke bei der nächsten Überfahrt führen, eine zu lange Wartezeit zwischen den Wiederholungen zu Veränderungen anderer Messbedingungen (z.B. Temperatur, Luftdruck im Messreifen usw.). Hiermit wird das Problem von Griffigkeitsuntersuchungen deutlich, die nicht unter Laborbedingungen stattfinden. Der Messwert hängt von den konkreten (sich verändernden) Messbedingungen ab und kann nie

exakt reproduziert werden. Art und Weise der Griffigkeitsmessung sind damit bereits die Ursache für fehlende Vergleichbarkeit von Messwerten. Natürlich können die schwankenden Rahmenbedingungen während der Messung in ihrer Wirkung auf den Messwert kompensiert werden. Voraussetzung dafür ist jedoch:

- a) die exakte Bestimmung der Einflussgröße und
- b) die Kenntnis über den Zusammenhang zwischen Einflussgröße und Griffigkeitswert und eine entsprechende mathematische Formulierung.

Es wird ersichtlich, dass die Forderungen nach großen zeitlichen Messzwischenräumen einerseits und kleinen Versuchszeiten andererseits einander konkurrieren. Weder die besonders schnelle, noch die ausgedehnte Folge an Messungen lässt die Einhaltung von Vergleichbedingungen zu.

In der praktischen Umsetzung muss daher ein Kompromiss gefunden werden. Für die Ermittlung des Zusammenhangs zwischen SCRIM und GripTester sind simultan durchgeführte Messungen wünschenswert, die sich jedoch gegenseitig nicht beeinflussen und deshalb unabhängig voneinander durchgeführt werden. Welche Datenbasis für diese Arbeit zur Verfügung stand, wird an einer späteren Stelle (Abschnitt 3.2.1) erörtert.

Ein anderes Problem besteht im verfahrensspezifischen Charakter des Griffigkeitsmesswertes. Der Messwert selbst besteht nur in Verbindung mit einem bestimmten Messverfahren bzw. Messprinzip. Dadurch werden folgende Aussagen bedingt:

- (1) Anders als bei einer physikalischen Größe lässt sich kein genaueres Verfahren anwenden, um einen Genauigkeitsvergleich des Messwertes zu ermöglichen.
- (2) Die Messwerte von Geräten gleicher technischer Bauart sind gleichwertig. Kein Messgerät ist genauer als das andere und ist damit im technischen und statistischen Sinne genauer als das andere.
- (3) Unterschiedliche Messprinzipie erzeugen unter Umständen unterschiedliche Zahlenwerte der Griffigkeit und sind messtechnisch gesehen gleichwertig zu betrachten.

An diesen Aussagen wird im Wesentlichen das in dieser Arbeit vertretene inhaltliche Verständnis vom richtigen Wert deutlich. Ein anderes Verständnis des richtigen Wertes ist ebenso legitim, führt dann jedoch zu einer anderen Herangehensweise, zu anderen Folgerungen bis hin zu anderen statistischen Modellen.

▼ In dieser Arbeit wird der richtige Wert zu einem Prüfverfahren als arithmetischer Mittelwert aus den Messwerten dieses Verfahrens gesehen.

Insbesondere ist damit kein Prüfgerät dem anderen Prüfgerät desselben Verfahrens vorzuziehen. Werden Messwerte mit unterschiedlichen Prüfgeräten des gleichen Prüfverfahrens ermittelt, so soll deren Mittelwert der richtige Wert sein.

Werden Messwerte mit unterschiedlichen Prüfgeräten von unterschiedlichen Verfahren ermittelt, so unterscheiden sie sich im messtechnischen Sinne nicht, denn der prüfverfahrensspezifische Bezug der Messwerte verbietet einen direkten Vergleich mit dem Ziel einer Genauigkeitsaussage. Die Messwerte eines Prüfverfahrens können nicht als Referenz für die Messwerte des anderen Verfahrens verwendet werden. Zudem hat sich bei Griffigkeitsmessverfahren gezeigt, dass ihre Wiederholgenauigkeit ähnlich hoch ist.

Die bessere Interpretierbarkeit der Messwerte eines Verfahrens auf Relevanz zum Reibungszustand zwischen Reifen und Fahrbahn gegenüber den Messwerten eines anderen Verfahrens und die daraus resultierende bessere Einigung als Referenz bleibt davon unberührt. Im messtechnischen und statistischen Sinne sind die Verfahren gleichwertig.

Richtiger Wert zwischen SCRIM und GripTester

Weder mit dem Prüfverfahren SCRIM noch mit dem Prüfverfahren GripTester können die tatsächlich wirkenden physikalischen Kräfte zwischen Fahrbahn und Reifen vollständig beschrieben werden. Es wäre deshalb falsch eines der beiden Verfahren als da ‚richtigere‘ bzw. primäre und das andere Verfahren als das sekundäre Verfahren zu bezeichnen. Beide Verfahren sind messtechnisch und wahrscheinlich auch hinsichtlich ihrer Interpretierbarkeit gleichwertig $\{\Delta M\}$.

Es musste jedoch eine (interne) Rangfolge festgelegt werden, da das Ziel dieser Arbeit war, einen BWH für den GripTester vor dem BWH der SCRIM zu entwickeln. Dies bedingt, das Prüfverfahren SCRIM in dieser Arbeit als ‚führendes‘ Verfahren und das Prüfverfahren GripTester als ‚folgendes‘ Verfahren zu betrachten.

Festlegung von Zeichen und Symbolen in dieser Arbeit

In dieser Arbeit wird ein Messwert x der SCRIM als Ausprägung des Prüfmerkmals X mit dem wahren Wert ξ und ein Messwert y des GripTesters als Ausprägung des Prüfmerkmals Y mit dem wahren Wert η bezeichnet.

Je nach Art der Versuchsbedingungen werden Standardabweichungen unter Wiederholbedingungen σ_r und Standardabweichungen unter Vergleichbedingungen σ_R unterschieden. Diese Größen werden auch als Maße für die Präzision der Prüfverfahren

verwendet und über Ringversuche unter Vergleich- und Wiederholbedingungen nach DIN ISO 5725 ermittelt.

2.2.2 Verfahren zur Bestimmung des Griffigkeitswertes

International werden unterschiedliche Verfahren zur Griffigkeitsbestimmung eingesetzt. Sie unterscheiden sich in Aufbau und Anwendung. Allen Verfahren gemeinsam ist die kontaktbezogene Messung. Für die Messung wird auf der Straßenoberfläche ein Wasserfilm erzeugt und anschließend ein Messrad über die Straßenoberfläche gezogen. An den Messrädern wird ein Schlupf erzeugt, so dass die Räder nicht vollständig abrollen, sondern über die Straßenoberfläche gleiten (Simulation eines Bremsvorgangs bzw. einer Kurvenfahrt). Die dabei am Messreifen entstehenden Kräfte werden ermittelt und daraus wird später der Griffigkeitswert abgeleitet. In dieser Arbeit sind nur die Messverfahren SCRIM und GripTester Gegenstand der Betrachtung.

Prüfverfahren SCRIM

Beim Messverfahren SCRIM wird ein unter 20° zur Fahrtrichtung schräglaufer, sturzfreier und profilloser Messreifen (Motorradreifendimension) über die angenässte Fahrbahn gezogen. Durch die Schrägstellung wird ein Schlupf von ca. 32 % erzeugt. Der Reifen wird vertikal durch eine Gewichtskraft mit 1.960 kN belastet. Die axial in der Messradnabe wirkende Kraftkomponente F_y wird ermittelt. Der Quotient aus F_y und der vertikalen Belastung ergibt den sogenannten Seitenreibbeiwert.

$$\mu_{sc} = \frac{F_y}{1.960 \text{ kN}} \quad 2.2-1$$

Der Seitenreibbeiwert ist dimensionslos.

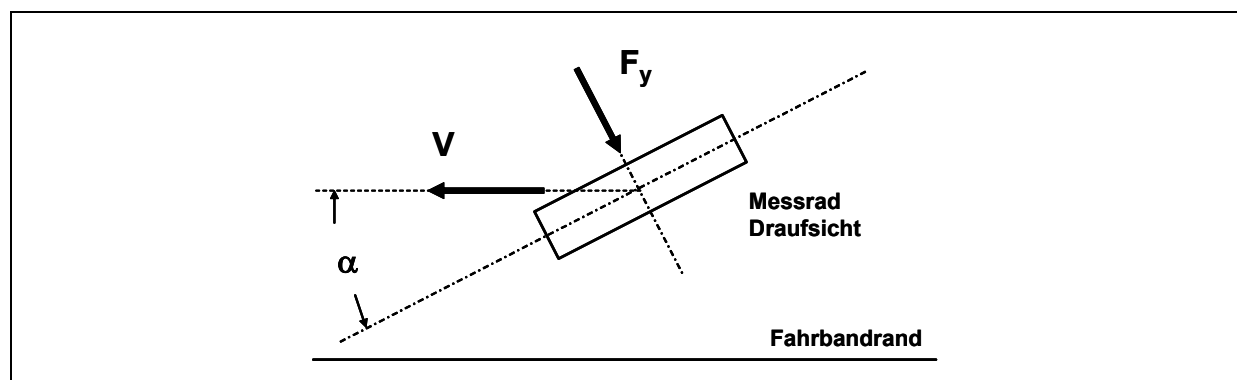


Abbildung 1: Seitenkraft am schräg gestellten SCRIM-Rad, Köhler 1993

Wesentlichen Einfluss auf den Messwert haben die Messgeschwindigkeit, die Wasserfilmdicke und die Temperaturverhältnisse. Sie werden daher für die Messung in engen Grenzen vorgegeben. Die theoretische Wasserfilmdicke wird mit 0,5 mm angegeben. Die

tatsächliche Wasserfilmdicke hängt jedoch stark von den vorhandenen Texturtiefen der Fahrbahn ab.



Abbildung 2: links: SCRIM-Rad mit Bewässerungseinrichtung, DAV 2001; rechts: Lage der Messlinie im Bezug auf die Seitenrandmarkierung, MECHATRONIC

Im Hinblick auf eine gute Reproduzierbarkeit wird in der technischen Prüfvorschrift die Messspur vorgegeben. Als Bezug wird eine Messlinie mit einem konstanten Abstand zur Fahrbahnrandmarkierung gewählt, ARS 24/2003 des BMVBW. Diese Messlinie liegt in der Nähe der rechten Rollspur am Ort der vermutlich geringsten Griffigkeit ca. 70 bis 80 cm von der rechten Fahrbahnrandmarkierung.

Prüfverfahren GripTester

Der GripTester ist ein Messanhänger, der von einem Pkw oder Kleinbus gezogen werden kann. Der GripTester basiert auf dem Prinzip des unter konstantem Schlupf gebremsten Messrades und simuliert somit das Bremsverhalten eines Fahrzeugs.



Abbildung 3: links: GripTester, Ansicht von unten, rechts: Zugfahrzeug mit GripTester der TUD

Der GripTester kann im Zugbetrieb (mit einem Zugfahrzeug) und im Schubbetrieb (ohne Messfahrzeug, im Handbetrieb) eingesetzt werden. Laut Herstellerangaben können Messungen zwischen 5 km/h (Schubbetrieb) und 130 km/h (Zugbetrieb) durchgeführt werden.

Die Bestimmung des Reibwertes erfolgt an einem in der Mitte des Anhängers angebrachten Messrad, welches parallel zur Fahrtrichtung steht. Über einen Kettenantrieb, der die Achse des Anhängers über eine Übersetzung mit dem Messrad verbindet, wird ein konstanter Schlupf 15,6 % aufgebracht. Die an dem Rad angreifende Längskraft wird über Dehnungsmessstreifen bestimmt. Die auf die Achse wirkende vertikale Last wird nach dem gleichen Messprinzip bestimmt. Der GripTester wird in Deutschland mit einer theoretischen Wasserfilmdicke von 0,5 mm betrieben.

Mögliche Ursachen für die Messwertunterschiede zwischen SCRIM und GripTester

Obwohl die äußeren Messbedingungen für beide Verfahren weitgehend identisch sind (Wasserfilmdicke, Spurwahl, Messwiederholungen...), zeigen sich Unterschiede in der Reaktion auf verschiedene Beläge und in den Messwerten. Die Ursachen dafür sind sicher vielfältig. An dieser Stelle können nur einige Einflüsse angesprochen werden, ohne dass dabei die Vollständigkeit gewahrt ist. Es ist sicher davon auszugehen, dass die registrierten Unterschiede nicht das Ergebnis einer einzelnen Ursache sind, sondern das Zusammenwirken verschiedener Ursachen ist.

a) unterschiedlich erzeugter Wasserfilm

Eine Ursache wird in der Erzeugung der Wasserfilmdicke gesehen. Beide Systeme benutzen eine rechnerische Wasserfilmdicke von 0,5 mm, die aber mit unterschiedlichen technischen Konstruktionen aufgebracht wird. Lokale Turbulenzen im Wasserstrom oder Querschnittsänderungen im Wasserfilm in Verbindung mit unterschiedlich hohen Reifenlasten könnten bereits zu unterschiedlichen Dicken des Wasserfilms zwischen Reifen und Fahrbahnoberfläche führen.

b) unterschiedlicher Reifenschlupf und Radlast

Der schräg laufende Reifen der SCRIM hat einen Schlupf von 34 %. Der Messreifen des GripTesters dagegen 15,6 %. Bei einer mittleren Messgeschwindigkeit von 60 km/h ergibt sich dadurch eine Differenz in den Gleitgeschwindigkeiten von ca. 10 km/h. Dadurch verschiebt sich das Verhältnis zwischen Adhäsions- und Hystereseanteil in der Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn. Mit steigender Gleitgeschwindigkeit nimmt der Adhäsionsanteil ab, während der Hystereseanteil zunimmt. Die resultierende Reibung setzt sich nach dem Superpositionsprinzip zusammen. Werden gleiche Materialeigenschaften des

Messreifengummis für SCRIM und GripTester unterstellt, dann müssten die Adhäsionsanteile bei beiden Reifen ähnlich hoch sein, wenn die Gleitgeschwindigkeiten identisch wären. Der Hysteresanteil in der Reibung, als Resultat des Dämpfungsverhaltens des Reifens, wird schon durch die Konstruktion des Reifens nicht identisch sein können. Mit steigenden Radlasten sinkt das aktivierbare Reibungspotential und das Maximum tritt bei geringeren Schlupfzahlen auf. Die Radlast auf dem SCRIM-Messreifen ist etwa 8 bis 10 mal höher als die Radlast auf dem GripTester-Messreifen. Bei annähernd identischen Aufstandsflächen ist damit der Anpressdruck bei der SCRIM wesentlich höher als beim GripTester.

2.3 Griffigkeit und Unfälle

2.3.1 Modelle im Allgemeinen

▼ Modelle sind abstrakte Abbildungen der Realität, um wesentliche Zusammenhänge in einer vereinfachten Form darzustellen und zu veranschaulichen. Zur Bildung von Modellen werden Annahmen getroffen, Voraussetzungen vereinbart und damit die Modellgrenzen formuliert. Die Konzentration auf die wesentlichen Zusammenhänge impliziert eine Vernachlässigung von kleinen ‚unbedeutend scheinenden‘ Einflüssen. Durch diese Vernachlässigung sind Modelle, auch wenn sie die wesentlichen Zusammenhänge richtig wiedergeben, nur beschränkt genau $\{\Delta M\}$.

2.3.2 Modelle zur Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Griffigkeit und Unfällen

Ein Ziel der Unfallforschung vergangener Jahre war die Darstellung des Zusammenhangs zwischen Griffigkeit und Unfallgeschehen als eine mathematische Formulierung mit dem Ziel, aus diesem Zusammenhang Mindestgriffigkeitswerte abzuleiten. Mit Überschreitung eines Mindestgriffigkeitswertes soll ein Straßenzustand definiert werden, der Zuordenbarkeit von Unfällen infolge zu geringer Griffigkeiten vermeidet.

Der Zusammenhang zwischen Unfallzahlen oder Unfallursachen besteht im günstigen Fall aus einer eindeutigen mathematischen Funktion. Die Forschung der letzten Jahre konzentrierte sich auf:

- a) die Ursachenforschung und Wirkung verschiedener Einflüsse bei der Unfallentstehung bzw. Unfallvermeidung,
- b) die Formulierung eines mathematischen Zusammenhangs zwischen Unfallkennzahlen und Griffigkeitswerten und

c) die Ableitung von Mindestgriffigkeitswerten zur Unfallvermeidung.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Griffigkeit immer nur eine Komponente bei der Entstehung von Unfällen war. Unfälle sind immer die Folge aus einem Komplex an Einflüssen, die zur Unfallentstehung beitragen. Fehlende Griffigkeitswerte führen deshalb nur im Zusammenwirken mit anderen ungünstigen Einflüssen zu Unfällen. Hohe Griffigkeitswerte sind deshalb notwendig, aber nicht hinreichend zur Unfallvermeidung. Die Auswirkung dieser Tatsache auf die Formulierung von Mindestgriffigkeitswerten wird im nächsten Abschnitt gezeigt.

Die Ursachenforschung im Zusammenhang zwischen Unfällen und Griffigkeitswerten hat sich im Wesentlichen auf zwei Strategien konzentriert. Im ersten Ansatz wurden mit statistischen Methoden die verfügbaren Daten zu Unfällen ausgewertet und über die gemittelten Größen ein Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Unfallkennzahlen interpretiert. Aus dem Zusammenhang wurden Mindestgriffigkeitswerte abgeleitet, unterhalb derer ein signifikanter Anstieg von Unfallzahlen zu erwarten ist. Im zweiten Ansatz wurden Bremsversuche durchgeführt und die beobachtete bzw. notwendige Bremsverzögerung mit den Mindestgriffigkeitswerten korreliert.

Ergebnisse der statistischen Analysen von Schulze, Wehner und Hiersche

Erste größere Untersuchungen über den Zusammenhang zwischen Griffigkeit und Unfallgeschehen wurden von Wehner und Schulze in den 50iger und 60iger Jahren unternommen. Sie nutzten dazu die Messdaten aus unterschiedlichen Messkampagnen mit dem Stuttgarter Reibungsmesser (SRM).

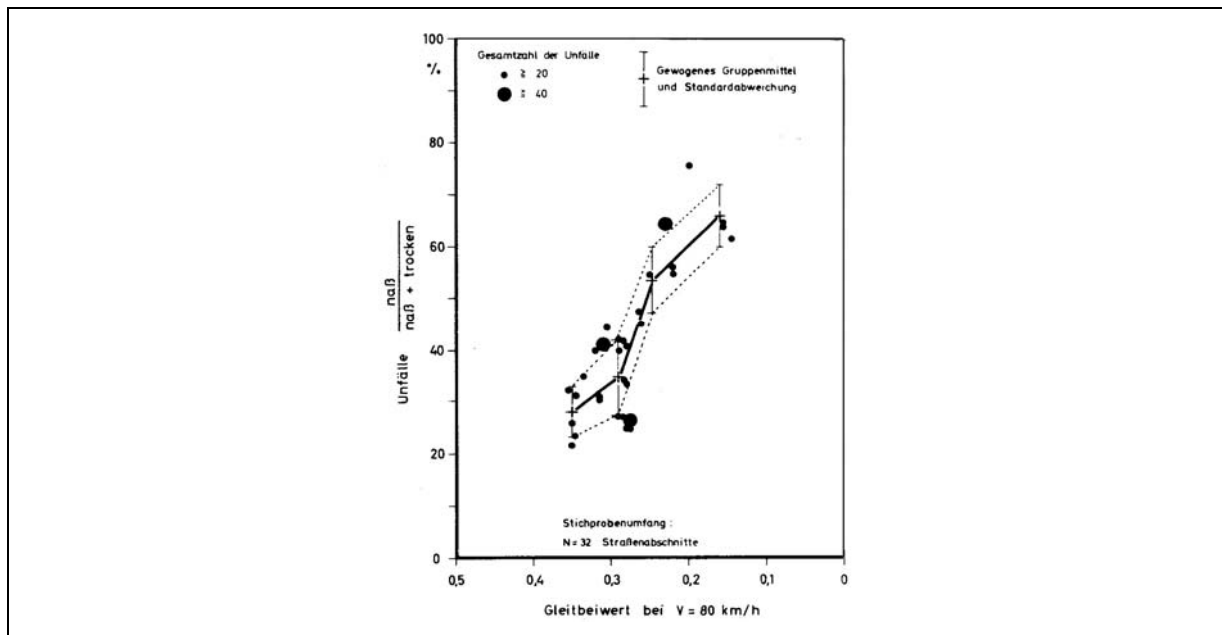


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen Griffigkeitswert und Anteil der Unfälle bei Nässe, dargestellt durch gewogene Gruppenmittel und zugehörige Standardabweichungen, SCHULZE 1975

An den untersuchten Unfallhäufungsstellen wurde das Verhältnis zwischen der Anzahl von Unfällen auf nasser Fahrbahn und der Anzahl von Unfällen auf nasser und trockener Fahrbahn gebildet und den Griffigkeitsmesswerten des SRM gegenübergestellt. Aus Abbildung 4 wird zumindest tendenziell deutlich, dass bei herabgesetztem Kraftschluss der Anteil der Unfälle bei Nässe ansteigt. Der Zusammenhang zwischen Unfallkenngrößen und Griffigkeit wurde aber von Schulze als eher lose bewertet, was sich hier durch eine große Streuung bemerkbar macht. Infolge der großen Streuungen sind nur extrem niedrige Griffigkeitskennwerte eindeutig mit einem hohen Anteil der Unfälle bei Nässe verknüpft. Den Grund für die große Streuung sah Schulze im Einfluss von weiteren, nicht erfassten Faktoren, die neben der Griffigkeit auf das Unfallgeschehen wirken. Diese Faktoren überlagern den Einfluss der Griffigkeit, können ihn verstärken, abschwächen oder sogar aufheben.

HIERSCHE 1990 ging mit seinen Unfalluntersuchungen den Schritt zu einer multivarianten statistischen Analyse unterschiedlichster Merkmale und Einflussfaktoren. Insgesamt bezieht er in seine Analyse etwa 30 Einflussfaktoren ein. Abbildung 5 zeigt einen Auszug seiner Ergebnisse. Die Abbildung soll an dieser Stelle nicht vollständig interpretiert werden. Sie vermittelt aber einen guten Eindruck von der Komplexität im System Unfall und dem Zusammenhang einzelner Faktoren.

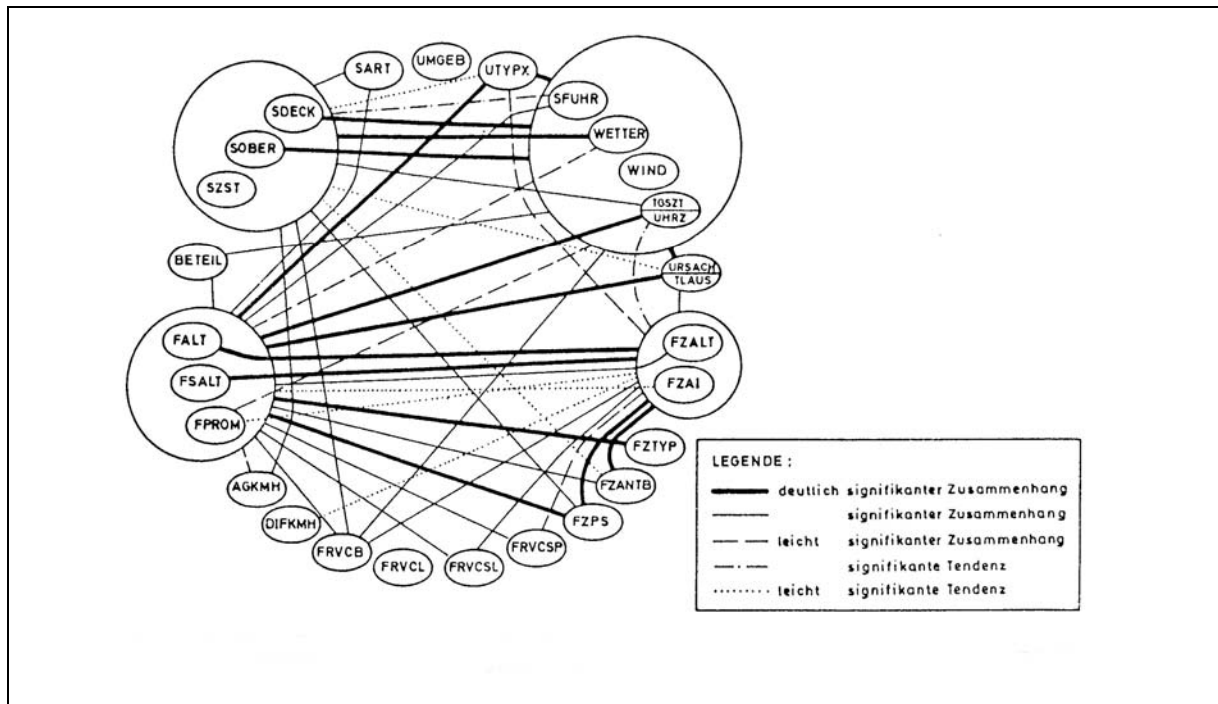


Abbildung 5: Signifikante Zusammenhänge für Außerorts-Unfälle nach HIERSCHE 1990

Dargestellt sind unterschiedliche Einflussfaktoren aus Umfeld, Fahrbahn, Fahrzeug und Fahrer und deren Bezug zueinander. Je stärker die Linienverbindung zwischen zwei Faktoren ausgeprägt ist, desto enger ist ihr Zusammenhang. Hiersches Untersuchungen zufolge ist das System ‚Unfall‘ ein komplexes Gebilde aus unterschiedlichen Einflussfaktoren. Dabei kommt Hiersche zu dem Schluss, dass dem menschlichen Fehlverhalten eine besondere Bedeutung im Unfallgeschehen zugerechnet werden muss. Er beziffert den Anteil des Fahrers als Unfallursache auf ca. 90 %. Nur die restlichen 10 % werden durch objektive Eigenschaften des Umfeldes, also auch die Griffigkeit, bedingt.

Aus der Analyse von Hiersche wird damit deutlich, dass das Auftreten von Unfällen einem Komplex an Einflussfaktoren unterliegt und nicht von mangelnder Griffigkeit allein verursacht wird. Zwangsläufig muss deshalb eine geringe Griffigkeit allein nicht zu einem Unfall führen, wenn andere Einflussfaktoren der Unfallentstehung günstig entgegenstehen und umgekehrt wird eine höhere Griffigkeit nicht zwingend zu einer Unfallvermeidung führen. Griffigkeit ist folglich oft nicht die alleinige Unfallursache.

Zusammenfassend konnte mit der statistischen Methode nur ein loser Zusammenhang zwischen den Unfallkennzahlen und den Griffigkeitswerten aufgezeigt werden. Folgende Aspekte können dafür wesentlich sein:

- (1) Nicht alle wesentlichen Einflüsse auf das Unfallgeschehen werden erfasst.
- (2) Die wesentlichen Einflüsse werden in ihrer maßgebenden Größe nicht richtig ermittelt (nachträgliche Unfallaufnahme erst später zu veränderten Bedingungen).
- (3) Die mathematische Formulierung erfasster Einflüsse auf die Unfallentstehung ist nicht ausreichend.
- (4) Der Griffigkeitsmesswert gibt nicht den tatsächlichen Reibungszustand zwischen Reifen und Fahrbahn beim Unfall wieder.

Diese Faktoren führen zu einer unpräzisen Formulierung des Zusammenhangs zwischen Unfallursache und Griffigkeit $\{\Delta M\}$.

Die aus dem Zusammenhang nach Abbildung 4 abgeleiteten Folgerungen für die Empfehlung von Richtwerten der Mindestgriffigkeit im ‚Merkblatt über die Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe‘ 1.Ausgabe 1966, 2.Ausgabe 1968, waren deshalb entsprechend ‚zurückhaltend‘ formuliert:

▼ ‚Nur extrem niedrige Griffigkeitskennwerte ... sind recht eindeutig mit einem außergewöhnlich hohen Anteil der Unfälle bei Nässe verknüpft. Und nur überdurchschnittlich hohe Griffigkeitskennwerte lassen erwarten, dass die Straßenoberfläche keinerlei Einfluss auf das Unfallgeschehen bei Nässe ausübt. Dazwischen aber liegt der weite Übergangsbereich nicht extrem niedriger bis durchschnittlicher Griffigkeitskennwerte: In diesem Bereich ist ein Einfluss der Griffigkeit der Straßenoberfläche auf das Unfallgeschehen bei Nässe weder auszuschließen noch mit Sicherheit anzunehmen.‘ MERKBLATT, STRAßENGRIFFIGKEIT 1968

Ergebnisse der fahrdynamischen Untersuchungen von Steinauer

In seinen fahrdynamischen Betrachtungen untersuchte Steinauer den Zusammenhang zwischen der erreichbaren Bremsverzögerung bei Nässe und den SCRIM Messwerten μ_{SC} , STEINAUER 2002. Dabei ermittelte er eine Funktion, welche die Übertragung von Bremsverzögerungswerten in μ_{SC} erlaubt. Mit dieser Funktion wurden die Mindestbremsverzögerungswerte aus dem Haltesichtweitenmodell der RAS - L in Mindestanforderungswerte der Griffigkeit umgerechnet. Steinauer leitet für Bundesstraßen eine erforderliche Griffigkeit ab, wenn sicher sein soll, dass der Fahrzeugführer auf

richtlinienkonform trassierten Straßen innerhalb der Mindesthaltesichtweite vor einem Hindernis anhalten können muss. Bei Betrachtung von Bundesstraßen ($v_{85} = 100 \text{ km/h}$) wurde eine Mindestgriffigkeit von $\mu_{SC} = 0,27$ ermittelt. Für Bremsungen vor Lichtsignalanlagen außerorts ($v_{85} = 70 \text{ km/h}$) ergibt sich ein Mindestgriffigkeitswert von $\mu_{SC} = 0,33$.

→ Unfälle mit Griffigkeitswerten oberhalb dieser Mindestgriffigkeitswerte sind damit nicht ursächlich auf eine zu geringe Griffigkeit zurückzuführen.

Die Untersuchungsergebnisse von Steinauer sind wesentliche Bedingungen bei der Formulierung des Bewertungshintergrundes SCRIM. Der BWH SCRIM wird im Abschnitt 2.4.1 diskutiert.

2.3.3 Notwendigkeit von Mindestgriffigkeitswerten

Die Forderung nach Mindestgriffigkeitswerten liegt in der Besonderheit des Griffigkeitsmerkmals.

Folgende Bilder sollen die Besonderheit veranschaulichen:



Abbildung 6: Darstellung zweier Streckenabschnitte mit signifikant unterschiedlicher Griffigkeit, MECHATRONIC AG

Das linke Bild zeigt einen Streckenabschnitt mit einer Griffigkeit $\mu_{SC, 60} = 0,26$. Die Griffigkeit liegt damit unterhalb des Schwellenwertes, das bedeutet unterhalb der Mindestgriffigkeit, und stellt nach M BGriff 2003 eine Stelle besonderer Gefährdung dar. Das rechte Bild zeigt einen Abschnitt mit einer Griffigkeit von $\mu_{SC, 60} = 0,59$ und hat damit eine ausreichende Griffigkeit nach M BGriff. Problem dabei ist, dass die Aufnahme der Informationen während des Fahrens zu 90 % über die Augen erfolgt und die Eigenschaft Griffigkeit sich nicht (oder nur sehr ungenau) über das Sehen abschätzen lässt. Das unterscheidet die Griffigkeit wesentlich von anderen Straßeneigenschaften, wie beispielsweise Linienführung oder Ebenheit, die sichtbar sind und die dem Fahrer die Möglichkeit bieten, seine Fahrweise darauf abzustimmen.

Die Notwendigkeit von Mindestwerten für die Griffigkeit folgt aus:

- (1) Griffigkeit ist eine weitestgehend nicht visuelle Eigenschaft der Fahrbahnoberfläche.
- (2) Griffigkeit wirkt im Moment der Befahrung und lässt keinen ausreichenden zeitlichen Spielraum für eine Fahrerreaktion zu.
- (3) Griffigkeit verringert sich nach dem Erreichen eines maximalen Kraftschlusses zwischen Reifen und Fahrbahn ‚schlagartig‘.

Auch ein aufmerksamer und verantwortungsbewusster Verkehrsteilnehmer ist nicht in der Lage, Stellen mit geringer Griffigkeit zu erkennen und daraufhin sein Fahrverhalten anzupassen. Dem Straßenbaulastträger kommt deshalb die Verantwortung zu, den Fahrbahnzustand so auszurichten, dass bei gemeingebräuchlicher Nutzung der Straße kein erhöhtes Risiko für Verkehrsteilnehmer entsteht.

2.3.4 Notwendigkeit von Anforderungswerten für die Griffigkeit

Der Straßenbaulastträger stellt dem Fahrer die Straße zur Nutzung zur Verfügung. Dabei hat der Straßenbaulastträger im Zuge der Verkehrssicherung die Pflicht, alle Maßnahmen zur Gefahrenabwehr und zur Abwendung voraussehbarer Schäden bei gemeingebräuchlicher Nutzung der Straße gegenüber dem Nutzer zu leisten, BARTLSPERGER 1999.

„Nach BGH Urt. 21.05.1985 ist die Verkehrssicherungspflicht die jedem, der Gefahrenquellen selbst hervorruft oder sie in seinem Einflussbereich andauern lässt, obliegende Pflicht, die nach Lage der Dinge erforderlichen Sicherheitsmaßnahmen zu treffen, damit sich die potenziellen Gefahren nicht zum Schaden anderer Personen auswirken können. Gefährlich ist dabei eine Straßenstelle, deren Beschaffenheit die Möglichkeit eines Unfalls auch dann nahe legt, wenn der Verkehrsteilnehmer bei zweckgerechter Benutzung und der **gebotenen Aufmerksamkeit die Gefahr nicht rechtzeitig erkennen** kann und sich auf sie nicht ohne weiteres einzustellen vermag (BGH Urt. 12.04.1973).“ BARTLSPERGER 1999.

Die Risikozuständigkeit des Straßenbaulastträgers endet da, wo sich der Straßenbenutzer verantwortungslos bewegt oder die Straße in einer anderen als der ihr zugeschriebenen Art nutzt.

2.4 Bewertung von Griffigkeitswerten und praktischer Umgang mit Anforderungswerten

Die Bewertung des Griffigkeitsmesswertes erfolgt auf der Grundlage eines Bewertungshintergrundes. Dieser BWH folgt inhaltlich einer gewissen Methodik bzw. Idee der Bewertung. Diese Idee der Bewertung ist jedoch nicht die einzig mögliche und/ oder

richtige. Die Festlegung einer Bewertungsmethodik ist, wie die Verwendung eines bestimmten richtigen Wertes oder die Methodik zur Festlegung von Mindestanforderungswerten, ein Teil der Gesamtsystematik Griffigkeit. Wesentlich zu verstehen ist dabei, dass diese Gesamtsystematik nur eine mögliche Form der Betrachtungsweise ist und entsprechend Einschränkungen bzw. Ungenauigkeiten beinhaltet { ΔM }. Bewertungshintergründe anderer Art sind gleichfalls denkbar, wurden aber bei SCRIM nicht angewendet. Der BWH der SCRIM hat seine Wurzeln in einem statistischen Ansatz mit Verbindung zu den fahrdynamischen Untersuchungen von Steinauer.

Die Analyse des derzeitigen Bewertungshintergrundes ist ein Teil der Arbeit, da die später angewendeten statistischen Methoden so konstruiert sind, dass sie die wesentliche Idee des Bewertungshintergrundes SCRIM berücksichtigen und erhalten.

2.4.1 Bewertungshintergrund der SCRIM in Deutschland

Der BWH für die SCRIM wurde 1990 von Becker aufgestellt. Becker schreibt dazu: ‚Da ... keine physikalisch–technisch begründeten Grenzwerte vorgegeben werden, wurden sie auf der Basis relativer Summenhäufigkeiten aus dem jeweiligen ‚Bewertungshintergrund‘ festgelegt.‘ Der BWH beruht auf den Verteilungsfunktionen der netzweiten Griffigkeit, gemessen mit den Geschwindigkeiten 40, 60 und 80 km/h. In Abbildung 7 ist der BWH der SCRIM dargestellt.

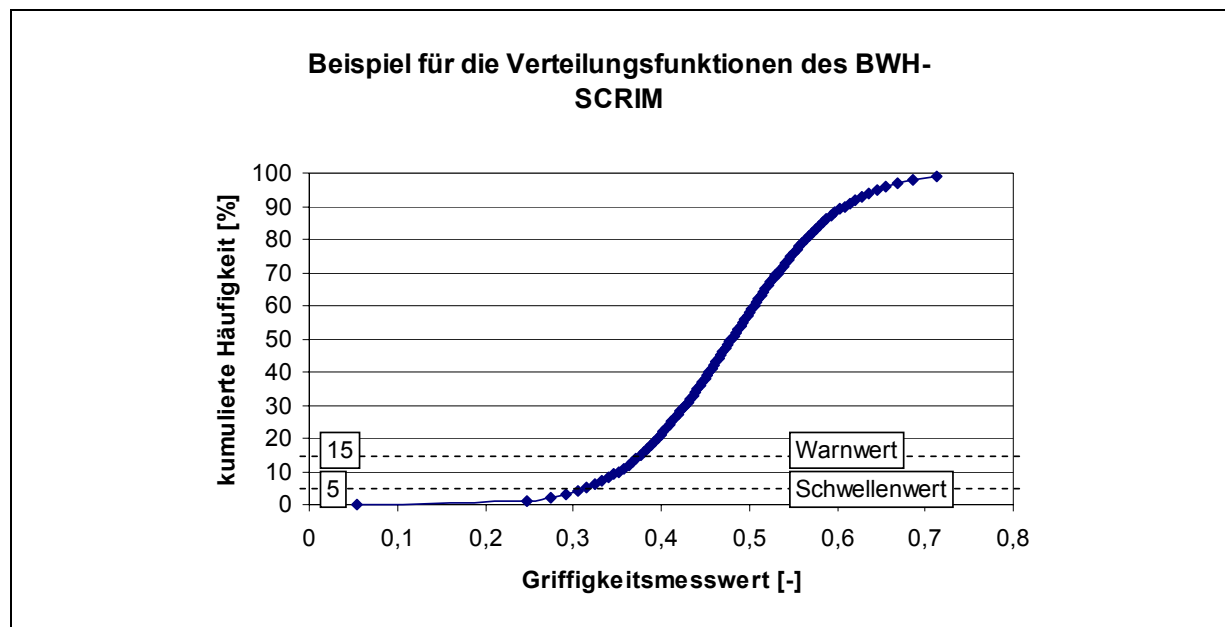


Abbildung 7: BWH der SCRIM als Verteilung von Griffigkeitswerten im Netz 1992

Im Hinblick auf die ZEB beschreibt BECKER 1992 die Anforderungen an einen BWH für Griffigkeitsmessungen folgendermaßen: ‘Für jedes dieser Messverfahren, dessen Messergebnisse (Zustandsgrößen) im Rahmen einer Zustandserhebung bewertet werden

sollen, wird eine dimensionslose, bewertete Skalierung benötigt, die das vorkommende Gesamtspektrum in die Bereiche sehr gute, gute bis mittelmäßige, schlechte und sehr schlechte Zustandswerte einteilt. Die im Rahmen der Systematik der Straßenerhaltung erstellte Einteilung erstreckt sich über eine Notenskala von 1,0 bis 5,0. Die Grenzen zwischen diesen vier Bereichen werden als Zielwert (1,5) Warnwert (3,5) und Schwellenwert (4,5) bezeichnet.'

Entsprechend dieser Anforderungen erfolgt die Beurteilung von Griffigkeiten im Rahmen der ZEB auf der Grundlage einer Normierungsfunktion, die sich auf drei **charakteristische Punkte** stützt. Die Punkte werden beschrieben als 1,5-Wert (früher **Zielwert**), **Warnwert** (Notenwert 3,5) und **Schwellenwert** (Notenwert 4,5). Der **Zielwert** soll bei neuen Fahrbahnstrecken angestrebt werden (M BGriff – StB, Ausgabe 2003).

Der **Warnwert** charakterisiert einen Zustand, dessen Erreichen Anlass zur Analyse der Ursachen für die Zustandsverschlechterung, zur intensiven Beobachtung der Stelle/ Strecke und zur Planung geeigneter Maßnahmen gibt (M BGriff – StB, Ausgabe 2003).

Der **Schwellenwert** charakterisiert einen Zustand, bei dessen Erreichen in der Regel Erhaltungsmaßnahmen oder eventuell Verkehrsbeschränkungen eingeleitet werden sollen. Mit den fahrdynamischen Untersuchungen hat Steinauer den Schwellenwert festgelegt.

Dem Ziel-, Warn- und Schwellenwert wurden ursprünglich folgende Perzentilwerte der Verteilungsfunktion zugeordnet: dem Zielwert 70 %, dem Warnwert 15 % und dem Schwellenwert 5 %. Das bedeutet beispielsweise für den Warnwert, dass 15 % aller Griffigkeitswerte in der Griffigkeitsverteilung der Grundgesamtheit kleiner sind.

Aus den Verteilungsfunktionen wurden über die vorgegebenen Prozentwerte die entsprechenden Quantilwerte (Zustandsgrößen) ermittelt. Die Zustandswerte und die Quantilwerte bilden Wertepaare, mit denen eine zweigeteilte lineare Normierungsfunktion definiert wurde. Den Zustandsgrößen zwischen diesen Wertepaaren werden die Zustandswerte über Interpolation zugeordnet.

In den letzten Jahren wurde die Normierungsfunktion verändert. Als charakteristische Punkte werden nur noch der Schwellen- und der Warnwert verwendet, die anderen Werte werden inter- bzw. extrapoliert. Die aktuelle Normierungsfunktion ist in Abbildung 8 dargestellt.

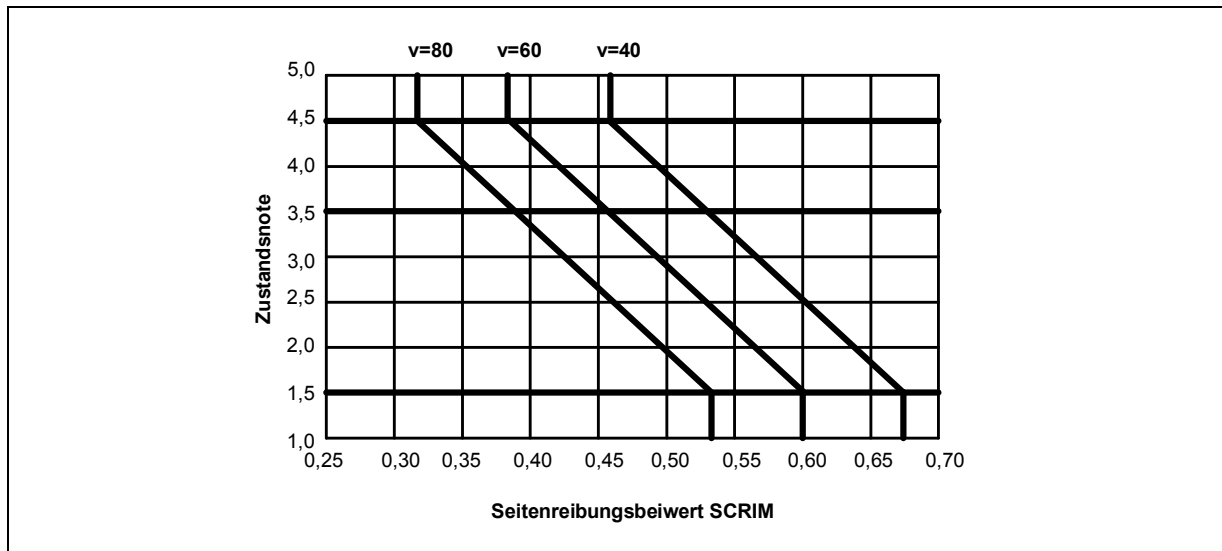


Abbildung 8: Normierungsfunktionen für die Griffigkeit nach AP 9/A1 zur ZEB 2001

Zur Vereinfachung wurde später die Zweiteilung zwischen den Zustandsnoten 1,5 und 4,5 in der Normierungsfunktion aufgehoben. Die dadurch entstandene einteilige lineare Normierungsfunktion stützt sich nur noch auf den Warn- und Schwellenwert. Alle anderen Zustandsgrößen werden inter- bzw. extrapoliert. Die in den ZTV genannten Grenzwerte für die Abnahme bzw. zum Ablauf der Verjährungsfrist für die Gewährleistung orientieren sich am Zustandswert 2,5 bzw. 3,5, stimmen mit diesen aber nicht exakt überein.

Die Zustandsgrößen für die Messgeschwindigkeiten 40 und 60 km/h wurden aus den Zustandsgrößen der Normierungsfunktion für 80 km/h abgeleitet. Dazu wurde der mittlere Zusammenhang zwischen Griffigkeitsmesswert und Messgeschwindigkeit genutzt. Danach fällt der Griffigkeitsmesswert linear mit steigender Messgeschwindigkeit. Mit Steigerung der Sollmessgeschwindigkeit um 20 km/h wird nach heutigem Kenntnisstand eine Verringerung des Messwertes um 0,05 angenommen, ARS 24/ 2003. In der Abbildung 8 bedeutet dies, dass die Linien der Funktionen für 40 und 60 km/h parallel zu der Linie der Funktion mit 80 km/h verlaufen. Im Gegensatz zur Abbildung aber müsste dies nicht mit einem Abstand in X-Richtung von 0,07, sondern von 0,05 erfolgen.

Neuermittlung des Bewertungshintergrundes SCRIM

Mit den durchgeführten Messkampagnen zur ZEB 1990 stand eine Vielzahl weiterer Messdaten aus dem deutschen Straßennetz zur Verfügung. Somit lag der Gedanke auf der Hand, den bereits vorhandenen BWH mit den neuen Messdaten zu vergleichen. Den Vergleich führten 1992 Klinghammer/ Gast durch. Mit den ca. 17.600 zur Verfügung stehenden 100 m-Mittelwerten formulierten sie den BWH für die Verteilung bei 80 km/h neu. Die hieraus derzeit resultierenden Zustandsgrößen und Grenzwerte für Griffigkeiten sind in

der M BGriff-StB, 2003 und in den entsprechenden ZTV (Asphalt, Beton, BEA) genannt. Folgende wesentliche Punkte sind aus der Analyse festzuhalten:

- (1) Es existieren unterschiedliche Verteilungsfunktionen aus den Untersuchungen von Becker und den Untersuchungen von Klinghammer/ Gast.
- (2) Der Perzentilwert und die Normierungsfunktion dienen zur Ermittlung des Quantilwertes.
- (3) Die Quantilwerte für 40 und 60 km/h wurden aus der Normierungsfunktion für 80 km/h ermittelt.

Die aktuellen Anforderungswerte sind in der folgenden Tabelle für die unterschiedlichen Sollmessgeschwindigkeiten 40, 60 und 80 km/h dargestellt. Gut zu erkennen ist der Sprung zwischen den einzelnen Zustandswerten innerhalb einer Zustandsnote von 0,05.

	Zustandswerte		
	Sollmessgeschwindigkeit		
	40	60	80
Zustandsnote	[km/h]	[km/h]	[km/h]
1,0	0,66	0,61	0,56
1,5	0,63	0,58	0,53
2,0	0,59	0,54	0,49
3,0	0,52	0,47	0,42
3,5 (Warnwert)	0,49	0,44	0,39
4,0	0,45	0,40	0,35
4,5 (Schwellenwert)	0,42	0,37	0,32
5,0	0,38	0,33	0,28

Tabelle 1: Zustandswerte der Normierungsfunktion für die Griffigkeit mit dem Messverfahren SCRIM nach M BGriff 2003

Für Griffigkeitsmessungen im Rahmen der Überprüfung einer im Bauvertrag zugesicherten Griffigkeit der Bauklassen SV und I bis VI werden in den ZTV Grenzwerte für die Abnahme und für den Ablauf der Verjährungsfrist für die Gewährleistung genannt.

	Sollmessgeschwindigkeit		
	40	60	80
	[km/h]	[km/h]	[km/h]
Abnahme	0,56	0,51	0,46
Ablauf der Verjährungsfrist für die Gewährleistung	0,52	0,48	0,43

Tabelle 2: Grenzwerte für die Beurteilung der Griffigkeit im Bauvertrag nach ZTV Asphalt-StB 01 korrigiert durch ARS 24/2003

Schlussfolgerung: Das Bewertungssystem für Griffigkeitsmessungen beruht auf einer pragmatischen Festlegung, die nicht den Anspruch auf Zuordnung zu einer konkreten nachteiligen Wirkung auf die Verkehrssicherheit erhebt. Insofern sind die Grenzwerte auch formal vor dem BWH zu betrachten. Die sich daraus ableitenden Perzentilwerte haben somit zunächst auch nur formalen Charakter $\{\Delta M\}$.

2.4.2 Beurteilung von Griffigkeitswerten in Deutschland - vorläufiger Bewertungshintergrund des GripTesters der TUD

Die Technische Universität Darmstadt wurde 1999 von der BASt mit der Erstellung eines vorläufigen Bewertungshintergrundes für den GripTester beauftragt. Für die statistische Auswertung stand Datenmaterial von über ca. 300 km Autobahnen, Bundesstraßen, Kreis- und Landesstraßen zur Verfügung, BALD, LUTZ, PEHLKE 2002. Aus dem vorliegenden Datenmaterial konnten ca. 2.900 100 m-Mittelwerte gebildet werden. Davon wurden ca. 70 % für eine Messgeschwindigkeit von 60 km/h, 18 % für eine Messgeschwindigkeit von 40 km/h und 12 % für eine Messgeschwindigkeit von 80 km/h ermittelt. Auf der Grundlage dieser Verteilungsfunktionen wurden die Anforderungswerte definiert. Man kam jedoch zu dem Schluss, dass die ermittelten Anforderungswerte infolge des vorhandenen Stichprobenumfangs weiterer Untersuchungen bedürfen.

2.4.3 Praktischer Umgang mit Anforderungswerten

Der Zusammenhang zwischen den Anforderungswerten Griffigkeit und dem Unfallgeschehen ist eher lose. Die Griffigkeit hat zwar eine Bedeutung für das Unfallgeschehen, aus der Größe des Griffigkeitswertes kann aber nicht auf verändertes Unfallgeschehen geschlossen werden.

Das Merkblatt zur Bewertung der Straßengriffigkeit bei Nässe, M BGriff-StB, Ausgabe 2003, empfiehlt deshalb, dass bei unfallauffälligen Streckenabschnitten und bei Griffigkeitswerten im Bereich des Schwellenwertes geeignete verkehrsrechtliche oder bauliche Maßnahmen vorzusehen sind. Das heißt, auch bei Streckenabschnitten, deren Griffigkeitsmesswerte noch als ‚gut‘ beurteilt werden, das Unfallgeschehen aber die Vermutung der Mitwirkung einer zu

geringen Griffigkeit nahe legt, sind entsprechende Maßnahmen zu treffen. Bevor bauliche Maßnahmen eingeleitet werden, ist jedoch zu prüfen, ob die Ursache für die erhöhte Anzahl von Unfällen bei Nässe dem Fahrbahnmerkmal Griffigkeit zugeordnet werden kann.

Das M BGriff-StB 2003 kommt zu dem Schluss, dass **Schwellenwerte** nur eine begrenzte Aussagekraft haben können und dass sie keinesfalls exakte Grenzwerte für ausreichende oder nicht ausreichende Verkehrssicherheit sind. Hinzu kommt, dass der Straßenbaulastträger nicht über die technischen Möglichkeiten verfügt, die Griffigkeit jedes Streckenabschnittes ständig zu überwachen. Jahreszeitliche Schwankungen oder Verschmutzungen der Fahrbahn zum Zeitpunkt der Griffigkeitsmessung können somit in ihrem Einfluss auf den Griffigkeitswert und damit auf die Überschreitung des Schwellenwertes nicht exakt beschrieben werden. Richtigerweise bezieht sich das M BGriff bei der Beurteilung des Straßenzustandes und der Veranlassung weiterer Maßnahmen auf die ingenieurtechnische Facheinschätzung der Gesamtsituation. Nur dadurch kann über den ‚bloßen‘ Messwert hinaus eine entsprechende Wirkung der Griffigkeit beim tatsächlichen oder potentiellen Unfallgeschehen interpretiert werden.

Der Messwert selbst ist offensichtlich notwendig, aber nicht hinreichend, um die Gefährdung eines Straßenabschnittes vollständig zu beschreiben. Dadurch stellt der Griffigkeitsmesswert nur **eine** Information zur Gefahrenbewertung dar, die in Kombination mit anderen Informationen aus dem Umfeld ein Gesamtbild ergibt. Nur dieses spiegelt näherungsweise die Gefährdungssituation wider. Der Griffigkeitsmesswert ist nicht in der Lage, die Gefährdung an einem Abschnitt **vollständig** zu beschreiben.

Schlussfolgerung: In diesem Sinne ist die Bestimmung der Griffigkeitswerte mit übermäßigem Aufwand und die Bewertung mit hoher Präzision ungerechtfertigt, wenn andere Informationen für die Einschätzung der objektiven Gefährdung nur ungenau ermittelt oder beschrieben werden können. Das heißt, die Beurteilung der Gefährdung wird nicht wesentlich verbessert oder genauer durch ‚hochpräzise‘ Messwerte. Allgemein, also im Messalltag und in der Bewertung von Griffigkeit, wird dem Zahlenwert des Messwertes aber insgesamt eine hohe Bedeutung beigemessen, da diese Information nach festgelegten objektiven Bedingungen ermittelt werden kann und damit als objektives Mittel der Beurteilung und des Vergleiches erscheint.

Da der Gedanke für die Beurteilung der Griffigkeit nach objektiven Kriterien dominiert, wird der Präzision des Griffigkeitsmesswertes allgemein eine hohe Bedeutung eingeräumt. Die Präzision der Griffigkeitsmessung erhält ihre Brisanz erst durch die Anwendung innerhalb eines festgelegten Bewertungssystems.

Im Allgemeinen hat das für dieses Bewertungssystem Folgendes zu bedeuten:

▼ Das derzeit angewendete Bewertungssystem Griffigkeit wird als Möglichkeit (Modell) zur Gefahrenabschätzung und –bewertung genutzt. Dieses Modell ist, seiner Natur nach, eine ungenaue und unvollständige Abbildung der tatsächlichen Situation. Es stützt sich im Wesentlichen auf das Prüfmerkmal Griffigkeit, das jedoch nur **eine** Information für die Gefahrenbewertung darstellt. Dieses Modell wird deshalb nur mehr oder weniger exakt die tatsächliche Gefährdung beschreiben können. Innerhalb der Modellgrenzen ist für die Bewertung eine hohe Messwertpräzision erforderlich. Außerhalb der Modellgrenzen ist eine hohe Messwertpräzision nicht relevant, da auch mit sehr präzisen Messwerten der Zusammenhang zwischen Griffigkeitswert und Unfallrisiko nicht genau beschrieben werden kann.

2.5 Vergleich von Messwerten unterschiedlicher Prüfverfahren

2.5.1 Allgemeine Erläuterungen

Griffigkeitsmessungen sind in nahezu jedem europäischen Staat Gegenstand von Untersuchungen. Die angewendeten Prüfverfahren sind kontaktbezogen, weichen aber in ihrer konstruktiven Ausbildung in der Regel voneinander ab. Zudem haben sich auf nationaler Ebene eigene Standards und Bewertungsverfahren entwickelt. Verschiedene nationale Bewertungsstrategien führen zu unterschiedlichen Beurteilungen des gleichen Reibungszustandes. Aus der Sichtweise der Verkehrssicherheit ist das nicht nachvollziehbar, weshalb Anforderungswerte in verschiedenen Ländern unterschiedlich definiert werden.

Zu den jeweiligen nationalen Prüfverfahren liegen oft langjährige Erfahrungen vor. Es würde erheblichen finanziellen Aufwand kosten, ein vereinheitlichtes Messsystem zu schaffen und in allen Staaten einzuführen. Im Rahmen einer europäischen und internationalen Harmonisierung der Bewertung werden deshalb Anstrengungen zum Vergleich von Verfahren bzw. Messwerten unternommen.

Anfang und Mitte der 90er Jahre wurden Untersuchungen zu Modellen des Messwertevergleichs unterschiedlicher Messverfahren durchgeführt. Die wichtigsten Modelle im Wertevergleich sind der **International Friction Index (IFI)** und der **European Friction Index (EFI)**. Grundgedanke und mathematische Struktur dieser Modelle sind ähnlich. Sie unterscheiden sich aber in der Wahl von Bezugsgrößen und Parameterwerten.

Darüber hinaus liegen Untersuchungen zur direkten Vergleichbarkeit von Messwerten für SCRIM und GripTester vor. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Abschnitt 2.5.3 dargestellt und Schlüsse für das weitere Vorgehen innerhalb dieser Arbeit gezogen.

2.5.2 Modelle zum Vergleich unterschiedlicher Prüfverfahren

International Friction Index (IFI)

Das IFI - Modell sieht einen großen Teil der Ungleichheit von Messwerten verschiedener Prüfverfahren in Unterschieden der verfahrensbedingten Gleitgeschwindigkeit des Gummis auf der Straßenoberfläche und in der unterschiedlichen Verfahrensreaktion bei Texturunterschieden auf der Fahrbahnoberfläche.

Für eine vereinheitlichte Beschreibung der Messwerte wurde für das IFI – Modell eine Bezugsgleitgeschwindigkeit von 60 km/h gewählt. Die Messwerte werden entsprechend ihrer tatsächlichen Gleitgeschwindigkeit auf die Bezugsgleitgeschwindigkeit korrigiert.

Die Oberflächentextur wird mit der **Mean Profile Depth (MPD)** oder die **Mean Texture Depth (MTD)** nach DIN ISO 13473 und ASTM E965 beschrieben. Die Werte a und b sind Parameter für die Beschreibung und Kalibrierung der Texturtiefenmessungen und schwanken erheblich in den Literaturangaben, siehe Tabelle 3.

FR_s stellt den unter einem bestimmten Geräteschlupf ermittelten Messwert dar. FR_{60} ist der vereinheitlichte, auf eine Gleitgeschwindigkeit von 60 km/h transformierte Wert.

$$FR_{60} = FR_s * e^{\frac{(S-60)}{V_p}} \quad 2.5-1$$

$$V_p = a + b(MPD) \quad \text{bzw.} \quad V_p = a + b(MTD). \quad 2.5-2$$

Um gerätespezifische systematische Messeigenschaften zu berücksichtigen, wurden neben a und b weitere Korrekturfaktoren vereinbart. Die Korrekturfaktoren A und B sind Gerätekorrekturfaktoren, die den spezifischen Charakter des Prüfgerätes, jedoch nicht des Prüfverfahrens berücksichtigen sollen. Der vereinheitlichte Griffigkeitswert lautet:

$$F60 = A + B * FR_{60}. \quad 2.5-3$$

In Tabelle 3 sind Beispiele für Parameter bei der Texturbeschreibung dargestellt.

	a	b
MPD nach ASTM E 1845 , nach LÓPEZ VALDÈS, GARNICA ANGUAS 2002	14,2	89,7
MTD nach ASTM E 965 , nach LÓPEZ VALDÈS, GARNICA ANGUAS 2002	-11,6	113,6
MPD , Transit New Zealand SLP nach CENEK, McLARIEN	9,74	104,71
MPD , HUSCHEK, MERZOUG 1997	-5,14	216,35

Tabelle 3: Regressionsparameter a und b für die Beschreibung der Textur verschiedener Untersuchungen

Mit den durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Dienst Wegen Waterbouwkunde (DWW) und Vejteknisk Institut (VI) 1996 durchgeführten Untersuchungen konnte die Wirkung des IFI nicht nachgewiesen werden. Dabei zeigte sich, dass die vereinheitlichten Werte FR_{60} weit streuten. Die Erklärung dafür wurde weitgehend darin gesehen, dass die in früheren Messungen ermittelten Werte A, B und a, b zu ungenau waren.

Anwendung des IFI zum Messwertvergleich

Das IFI-Modell geht von einer Abhängigkeit des Griffigkeitsmesswertes von der geometrischen Oberflächenstruktur aus. Auf Flächen mit hohen Anteilen an Mikrostrukturen wird in der Regel ein hoher Griffigkeitsmesswert bestimmt. Je höher der Anteil an Makrostrukturen wird, desto geringer wird der registrierte Messwert. Dieser Effekt wird auf die sinkende Häufigkeit der Kontaktpunkte zur Kraftübertragung zwischen Reifen und Fahrbahn bei steigender Makrotextur zurückgeführt. Entsprechend wird der Messwert infolge veränderter Makrotexturwerte korrigiert CENEK. Die Wirkung der Textur auf den Griffigkeitsmesswert ist im IFI-Modell nicht unabhängig von der Gleitgeschwindigkeit der Gummielemente über der Fahrbahnoberfläche zu sehen. Höhere Gleitgeschwindigkeiten führen zu kleineren Messwerten. Erklärt wird dies durch die Verlagerung der Reibungsanteile. Mit wachsender Gleitgeschwindigkeit wird der Anteil der Adhäsion geringer, während der Anteil der Hysterese steigt. Die nach IFI aufgebaute Messwertkorrektur ist deshalb textur- und geschwindigkeitsspezifisch. Für die Ermittlung des spezifischen Zusammenhangs zwischen GripTester und SCRIM soll die Verwendbarkeit dieses Modells geklärt werden. Ausgangspunkt sind vergleichende Daten mit bekannten Messgeschwindigkeiten für geschwindigkeitsspezifische Kalibrierlinien:

Für den GripTester:

$$FR_{60GT} = \mu_{GT} * e^{\frac{(S_{GT}-60)}{V_p}} \quad \text{mit Nutzung von Gerätekorrekturen}$$

$$F_{60} = A_{GT} + B_{GT} * FR_{60GT} = A_{GT} + B_{GT} * \mu_{GT} * e^{\frac{(S_{GT}-60)}{V_p}}$$

für die SCRIM:

$$FR_{60SC} = \mu_{SC} * e^{\frac{(S_{SC}-60)}{V_p}}$$

$$F_{60} = A_{SC} + B_{SC} * FR_{60SC} = A_{SC} + B_{SC} * \mu_{SC} * e^{\frac{(S_{SC}-60)}{V_p}}$$

Mit dem IFI-Ansatz erfolgt die Korrektur der Messwerte zu FR_{60GT} und FR_{60SC} . Es folgt daraus:

$$FR_{60GT} = \mu_{GT} * e^{\frac{(S_{GT}-60)}{V_p}} = \mu_{SC} * e^{\frac{(S_{SC}-60)}{V_p}} = FR_{60SC}$$

und mit Nutzung der Gerätekorrekturen folgt:

$$A_{GT} + B_{GT} * \mu_{GT} * e^{\frac{(S_{GT}-60)}{V_p}} = A_{SC} + B_{SC} * \mu_{SC} * e^{\frac{(S_{SC}-60)}{V_p}}$$

$$\begin{aligned} \frac{(A_{GT} - A_{SC})}{B_{SC}} + \frac{B_{GT}}{B_{SC}} * \mu_{GT} * e^{\frac{(S_{GT}-60)}{V_p}} &= \mu_{SC} * e^{\frac{(S_{SC}-60)}{V_p}} \\ \frac{(A_{GT} - A_{SC})}{B_{SC}} * e^{-\frac{(S_{SC}-60)}{V_p}} + \frac{B_{GT}}{B_{SC}} * \mu_{GT} * e^{\frac{(S_{GT}-60)}{V_p}} * e^{-\frac{(S_{SC}-60)}{V_p}} &= \mu_{SC} \\ \frac{(A_{GT} - A_{SC})}{B_{SC}} * e^{-\frac{(S_{SC}-60)}{V_p}} + \frac{B_{GT}}{B_{SC}} * e^{\frac{(S_{GT}-60-S_{SC}+60)}{V_p}} * \mu_{GT} &= \mu_{SC} \\ a' * e^{-\frac{(S_{SC}-60)}{V_p}} + b' * e^{\frac{(S_{GT}-S_{SC})}{V_p}} * \mu_{GT} &= \mu_{SC} \end{aligned}$$

Bei Verwendung des IFI-Modells werden die Gleitgeschwindigkeit S und die Wirkung der Oberflächentextur V_p berücksichtigt. Die Anwendung des Modells hängt jedoch von der inhaltlich sinnvollen und präzisen Ermittlung verwendeter Parameter ab. Für V_p muss abschnittsbezogener Wert MPD bzw. MTD ermittelt werden. Die Messung und Zuordnung dieser Werte sind jedoch bei Griffigkeitsmessungen derzeit nicht üblich und standen für diese Arbeit nicht zur Verfügung. Zudem zeigt Tabelle 3 wie stark die empirisch ermittelten Parameter a und b schwanken. Neueste Untersuchungen der FEHRL zeigten außerdem, dass das Modell für V_p überarbeitet werden muss und die Extrapolation auf die Bezugsgeschwindigkeit von 60 km/h bei IFI und 30 km/h bei EFI gerade für den GripTester ungünstig erscheint. In dieser Arbeit wurde deshalb auf die Anwendung des IFI und EFI-Modellansatzes verzichtet.

European Friction Index (EFI)

Auf den Erkenntnissen des IFI – Modells bauen die Untersuchungen des European Committee for Standardization (CEN) und dem FEHRL (Forum of European National Highway Research Laboratories) auf. Ein wesentlicher Nachteil des IFI wurde in dem hohen Wert der Bezugsgleitgeschwindigkeit von 60 km/h gesehen. Realistisch lagen die Gleitgeschwindigkeiten der meisten Verfahren deutlich niedriger.

In seiner mathematischen Struktur unterscheiden sich EFI und IFI unwesentlich. Wesentlicher Unterschied zum IFI – Modell ist die Bezugsgleitgeschwindigkeit von nunmehr 30 km/h.

$$EFI = A + B * F * e^{\frac{(S-S_R)}{S_0}} \quad 2.5-4$$

$$S_0 = a + b * MPD \quad 2.5-5$$

a = 57 und b = 56 nach VAN DEN BOL-DE JONG 2004.

Die Parameter A, B und a, b haben die gleiche Bedeutung wie im IFI-Modell. Zum Nachweis der Wirkung dieses Modells wurden Messungen auf unterschiedlichen Streckenabschnitten durchgeführt. Die dabei ermittelten Standardabweichungen unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen lagen mit 0,08 bzw. 0,14 dabei verhältnismäßig hoch.

Die Ursachen für diese hohen Ergebnisstreuungen wurden in **zwei** Faktoren gesehen.

- (1) Unzureichende mathematische Modellierung.
- (2) Verwendung von Modellparametern, die nicht ausreichend den Zusammenhang zwischen den Messwerten berücksichtigen.

Zusätzlich zu den Untersuchungen von IFI und EFI wurde deshalb ein mathematischer Ansatz höherer Komplexität verwendet, um das Modell den realen Verhältnissen stärker anzupassen. Die Parameter für diesen Ansatz wurden aus einem Teil des vorliegenden Datenmaterials gewonnen. Danach wurde mit diesem Ansatz der Gerätevergleich durchgeführt und anschließend die Standardabweichungen unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen ermittelt. Mit diesem Ansatz konnten die Standardabweichungen jedoch nur auf $\sigma_r = 0,01$ und $\sigma_R = 0,06$ verbessert werden.

2.5.3 Spezifische Modelle zum Vergleich der Prüfverfahren SCRIM und GripTester

Das Transport Research Laboratory (TRL) führte 1993 und 2003 Untersuchungen zur Vergleichbarkeit der Messsysteme SCRIM (SC) und GripTester (GN) durch. Im Rahmen der 1993 durchgeführten Untersuchung wurde ein linearer Ansatz gewählt und folgende lineare Gleichung ermittelt:

$$SC = 0,832(GN) - 0,046. \quad 2.5-6$$

Diese lineare Regression zeigt einen beachtlich hohen Korrelationskoeffizienten von $R = 0,98$ und damit eine gute Anpassung an die Messwertpaare.

In der 2003 durchgeführten Untersuchung wurden GripTester der neuen Baureihe Mark II mit der SCRIM verglichen. Für den Zusammenhang wurde ein proportionaler Ansatz gewählt und folgende Gleichung ermittelt:

$$SC = 0,85(GN) \quad 2.5-7$$

Der Korrelationskoeffizient dazu beträgt $R = 0,97$ und ist damit ähnlich hoch wie beim linearen Ansatz.

Beide Prüfsysteme, SCRIM und GripTester, werden unter anderem auch in Mexiko, Chile und Neuseeland eingesetzt. Entsprechend den europäischen Bemühungen zur Vereinheitlichung der Griffigkeitsmessungen wurden ebenso in diesen Ländern Anstrengungen unternommen, eine Vergleichbarkeit herzustellen. Meist basieren diese Vergleiche auf dem IFI - Modell und wurden entsprechend den nationalen Verhältnissen modifiziert. In Neuseeland ist die theoretische Wasserfilmdicke für die SCRIM 1 mm und für den GripTester 0,25 mm.

Vergleiche in Chile zwischen SCRIM und GripTester führten zu:

$$SC = 0,7521(GN) + 0,154. \quad 2.5-8$$

In Neuseeland wird der Zusammenhang zwischen SCRIM und GripTester bei einer Messgeschwindigkeit von 50 km/h und einem theoretischen Wasserfilm von 0,25 mm für beide Geräte durch TRANSIT 2002 wie folgt beschrieben:

$$SC = 0,42(GN) + 0,20. \quad 2.5-9$$

Anwendung des IFI-Modells auf den spezifischen Vergleich von Messwerten der SCRIM und des GripTesters

Auf der Grundlage der PIARC-Untersuchung hat das Department of Civil and Environmental Engineering und die University of Catania (Italien) weitere Untersuchungen durchgeführt,

um die Wirksamkeit des IFI-Modells für GripTester und SCRIM zu überprüfen, CAFISO, GRAZIANO, IPPOLITO 2004.

Die Untersuchungen zeigten aber, dass durch die Verwendung des IFI - Modells keine wesentliche Verbesserung der Korrelation zwischen GripTester und SCRIM möglich ist.

2.5.4 Abgeleitete Lösungsstrategie

Die vorangegangenen Abschnitte zeigten, dass weder die mathematischen Formulierungen noch die inhaltliche Beschreibung der Modelle ausreichend waren, um den Vergleich der Prüfverfahren SCRIM und GripTester ausreichend genau zu erreichen.

Dabei scheint die inhaltliche Interpretation der verwendeten Variablen problematischer zu sein als die Erweiterung der mathematischen Komplexität. Die uneingeschränkte Erweiterung der Komplexität stößt jedoch bei der Interpretation der Parameter an ihre Grenzen. Außerdem muss man sich darüber bewusst sein, dass weitere Parameter im Modell in der Regel empirisch ermittelt werden müssen und damit der Bestimmungsaufwand und die Unsicherheit des Ergebnisses (Resultatungenauigkeiten) steigen.

In dieser Arbeit sollte deshalb ein einfacher mathematischer Zusammenhang zwischen SCRIM und GripTester bestimmt werden. Es wird angenommen, dass durch die Formulierung eines **einfachen** aber **spezifischen** Modells ein Vorteil gegenüber komplexeren Modellen erreicht wird, zumal die Untersuchungen gezeigt haben, dass auch die Anwendung des IFI-Modells nicht zu einer Genauigkeitssteigerung beiträgt. Gleichzeitig bedeutet dies, dass durch den Ansatz eines sehr einfachen mathematischen Zusammenhangs Fehler implementiert werden $\{\Delta M\}$.

3 Methodik und Durchführung

Die Bearbeitung der Thematik hat gezeigt, dass sich in der textlichen Darstellung die methodische Vorgehensweise und die Durchführung nicht immer voneinander trennen lassen. Getroffene Hypothesen und Annahmen wurden oft bei der Umsetzung widerlegt und führten zu einer veränderten Sichtweise und Weiterführung. Der damit gegangene Weg ist das Resultat eines ständigen Abgleichs zwischen den theoretischen Ansätzen und der praktischen Umsetzbarkeit. Um die inhaltliche Transparenz zu wahren, soll dieser gegangene, mögliche Weg dargestellt werden und somit auch die Möglichkeit für andere Sichtweisen gegeben werden.

3.1 Fachlich methodisches Vorgehen -Strategie-

Ausgangspunkt der Betrachtung ist das vorhandene Bewertungssystem des Prüfverfahrens SCRIM. Das Bewertungssystem besteht aus Anforderungswerten, die aus dem Bewertungshintergrund der SCRIM abgeleitet wurden. Der Bewertungshintergrund besteht aus den Verteilungsfunktionen zur Griffigkeit auf dem Bundesfernstraßen der Bundesrepublik Deutschland, die in ZEB-Kampagnen 1990/ 92 ermittelt wurden. Es wurde Normalverteilung der Griffigkeit im Netz unterstellt. Eine Klassifizierung der Griffigkeiten im Netz wurden durch Perzentilwerte erreicht. Diesen Perzentilwerten sind Zustandsnoten zugeordnet, die über Normierungsfunktionen die Ermittlung der Anforderungswerte erlauben. Die Anforderungswerte wurden, zumindest partiell, durch fahrdynamische Untersuchungen gestützt.

Das für den GripTester aufzubauende Bewertungssystem sollte sich auf der Methodik des Bewertungssystems SCRIM stützen um den Methodenfehler auszuschließen. Mit diesem Vorgehen wird in dieser Arbeit nur ein möglicher, neben vielen anderen, Lösungsweg verfolgt.

Zunächst wird der technische Zusammenhang zwischen den Messwerten der SCRIM und des GripTester ermittelt. Der technische Zusammenhang wird über so genannte Kalibrierlinien mathematisch beschrieben. Dazu wurde aus unterschiedlichen vergleichenden Untersuchungen eine homogene, auswertbare Datenbasis von Messwerten SCRIM und GripTester geschaffen. Die Datenbasis wurde anschließend in Datenklassen ähnlicher Messabschnitte zerlegt und an diesen datenklassenspezifische Kalibrierlinien entwickelt.

Nach den Erkenntnissen der Untersuchungen letzter Jahre zum Verfahrensvergleich schien es sinnvoll, weniger komplexe Ansätze zu verwenden und die dabei gemachten Modellfehler „in Kauf“ zu nehmen. In dieser Arbeit wurden deshalb der einparametrig, proportionale Ansatz und der zweiparametrig, lineare Ansatz verwendet, da beide Ansätze geeignet scheinen.

Mittels der Kalibrierlinien lassen sich die Ergebnisse des einen Verfahrens in Ergebnisse des anderen Verfahrens transformieren. Somit können auch die Anforderungswerte des Verfahrens SCRIM über die Kalibrierlinien auf das Verfahren GripTester übertragen werden. Die Kalibrierlinien können nie den Zusammenhang der Ergebnisse vollständig beschreiben. Bei der Beschreibung des Zusammenhangs über Kalibrierlinien werden Ungenauigkeiten gemacht bzw. Fehler implementiert. Diese Fehler müssen bei den Anforderungswerten berücksichtigt werden.

Zur Übertragung der Anforderungswerte werden in dieser Arbeit zwei unterschiedliche statistische Verfahren verwendet. Beide Verfahren berücksichtigen die inhaltliche Struktur des BWH SCRIM und haben in ihrer Anwendung Vor- und Nachteile. Es kann zunächst kein Verfahren bevorzugt werden. Beide Verfahren werden angewendet und anschließend die Ergebnisse einer Plausibilitätskontrolle unterzogen um dabei eine Aussage über die Anwendbarkeit der Verfahren zu bekommen. Die Plausibilitätskontrolle wird mit bekanntem Wissen über den Zusammenhang zwischen Griffigkeitsmesswert und Messgeschwindigkeit durchgeführt. Danach konnten die für die Berechnung gesetzten Hypothesen und Annahmen auf Gültigkeit überprüft werden und wurden ggf. neu definiert. Folgende Teilaufgaben wurden im Rahmen der Arbeit gelöst:

- | | | |
|-----|---|-----------------|
| (1) | Ermittlung einer Datenbasis für die Ermittlung von Kalibrierlinien | → Abschnitt 3.2 |
| (2) | Ermittlung von Kalibrierlinien als technischer Zusammenhang zwischen zwei Prüfmerkmalen | → Abschnitt 3.3 |
| (3) | Transformation der Anforderungswerte | → Abschnitt 3.4 |
| (4) | Formulierung des Bewertungssystems GripTester | → Abschnitt 3.5 |

Entsprechend wurden die folgenden Abschnitte strukturiert. Aufgrund der Komplexität der Thematik wurden die methodisch theoretischen Ansätze jeweils in den einzelnen Abschnitten abgehandelt, da sonst die Übersichtlichkeit verloren geht.

Bei der Bearbeitung der Thematik zeigte sich, dass die Verfolgung einer bestimmten Lösungsstrategie sehr wohl geplant werden kann, die Umsetzung jedoch oft an den konkreten Verhältnissen scheitert. Viele Annahmen und Hypothesen mussten während der Arbeit verworfen und neu formuliert werden. Außerdem zeigt sich, dass oft mehr als eine gleichwertige Alternative für die Durchführung vorhanden ist, die Ergebnisse sich jedoch unterscheiden. In dieser Arbeit wurde versucht möglichst alle Alternativen zu berücksichtigen bzw. begründet auszuschließen. Der Lesende hat damit die Möglichkeit der ‚Nachvollziehbarkeit‘ und kann gegebenenfalls zu anderen Schlussfolgerungen kommen.

In der folgenden Abbildung ist eine schematische Übersicht enthalten, welche die wesentlichen Teile der Überlegungen wiedergibt. Zunächst wird die vorhandene Datenbasis aufbereitet und in unterschiedliche Klassen zerlegt. An den Messwerten dieser Klassen wurden spezifische Kalibrierfunktionen ermittelt (hier bezeichnet mit f_{40} , f_{60} , ...). Die anschließenden Kontrollen auf Plausibilität machten jedoch eine Neuordnung der Klassen und erneute Bestimmung der Kalibrierlinien notwendig (hier bezeichnet mit $f_{40,60,80}$).

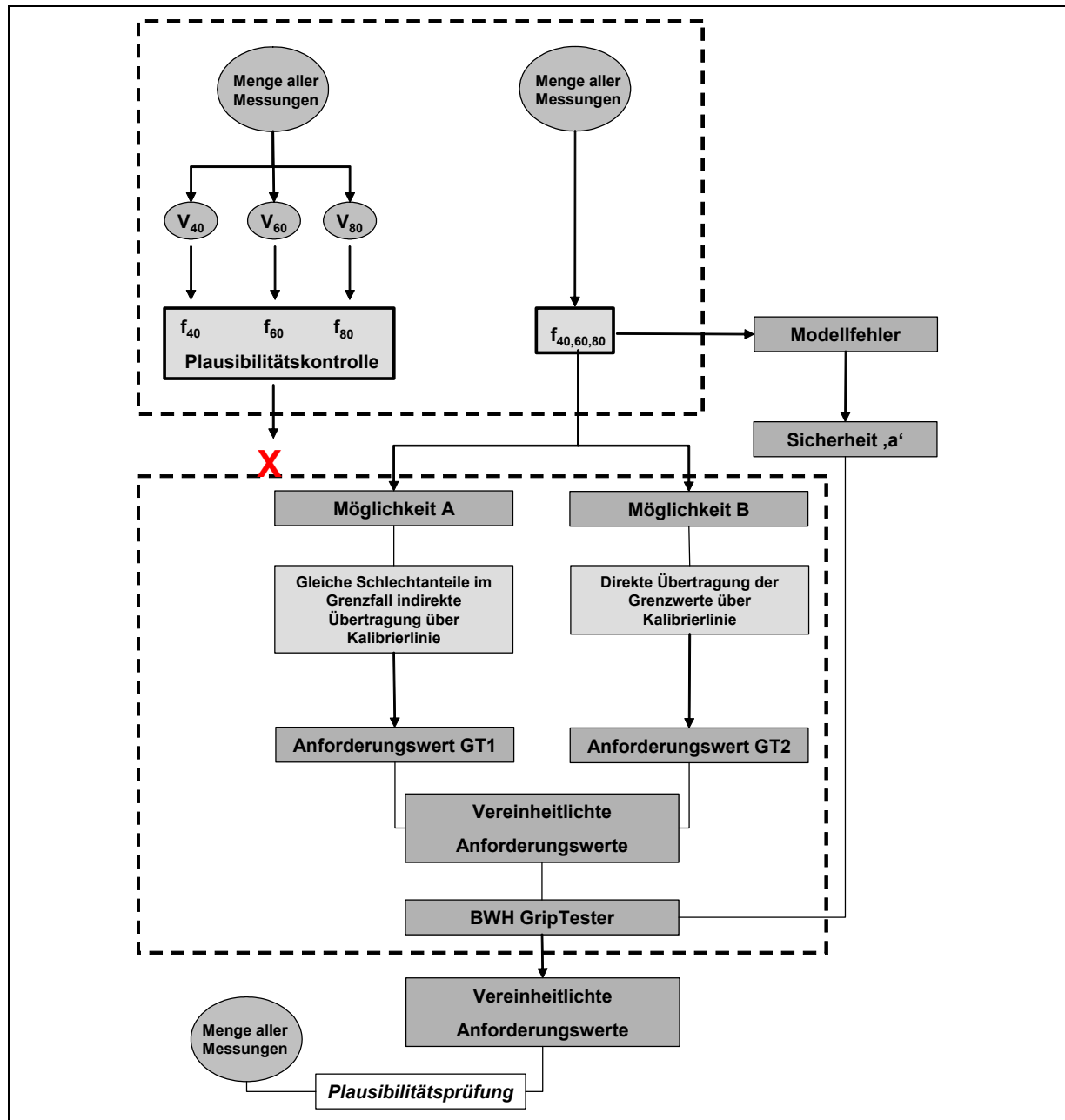


Abbildung 9: Auswerteschema

Die ermittelten Kalibrierlinien wurden bei der Anwendung unterschiedlicher statistischer Verfahren (Möglichkeit A und B) der weiteren Berechnung zugeführt. Gleichzeitig wurde an den Messwerten und den Kalibrierlinien eine Fehlerbetrachtung durchgeführt. Variationen in

der Datengrundlage, in den angewendeten Verfahren und den Kalibrierlinien (proportionaler und linearer Ansatz) lassen verschiedene Berechnungsläufe zu. Im Ergebnis entstehen unterschiedliche ‚Sätze‘ an Anforderungswerten. Die entstandenen Anforderungswerte und die Ergebnisse der Fehlerbetrachtung werden in einem Bewertungssystem GripTester zusammengeführt. Dieses wird anschließend an Messwerten verifiziert.

3.2 Ermittlung einer Datenbasis für die Ermittlung von Kalibrierlinien

Zur Ermittlung von Kalibrierlinien werden in der Regel technisch und organisatorisch aufwendige Kalibrierversuche durchgeführt. Die Kalibrierversuche müssen den Anforderungen an die Wiederhol- und Vergleichbedingungen gemäß Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen Teil 1, Ausgabe 2000, genügen.

Eine solche auswertbare Datenbasis liegt für diese Arbeit nicht vor. Es konnten jedoch nahezu simultan durchgeführte Vergleichsmessungen zwischen GripTester und SCRIM zusammengetragen werden, die, jede für sich genommen, nicht den Anspruch und den Umfang eines Kalibrierversuches haben. Die Zusammenfassung aller vorhandenen vergleichenden Untersuchungen ergibt eine relativ große Untersuchungsmenge. Es wird jedoch angenommen, dass die an dieser Menge bestimmten Kalibrierlinien hinreichend genau und repräsentativ sind um eine Übertragung der Anforderungswerte zu ermöglichen $\{\Delta M\}$. Spätere Kalibrierversuche sollen der Verifizierung dieser Kalibrierlinien dienen.

Im ersten Schritt wird ein möglicher Weg gezeigt, die Daten unterschiedlicher Untersuchungen zu einer Datenmenge zusammenzuführen und dabei die Informationen zur Datengenauigkeit zu berücksichtigen. Danach werden die Daten in Klassen zerlegt. Das damit verfolgte Ziel liegt in der Annahme, dass klassenspezifische Kalibrierlinien eine bessere Anpassung an die Datenbasis erlauben als Kalibrierlinien über die gesamte Datenbasis.

Die an den Klassen ermittelten Kalibrierlinien werden später auf signifikante Unterschiede untersucht. Zeigen sich signifikante Unterschiede, so wird die Klassenbildung beibehalten. Zeigen sich nichtsignifikante Unterschiede, so könnten diese zufällig sein. In diesen Fällen wurde eine erneute Datenklassifizierung durchgeführt. Der Vorgang zur Klassenbildung hat damit iterativen Charakter.

3.2.1 Vorhandenes Datenmaterial aus Vergleichsuntersuchungen

Die Übersicht in Tabelle 1 zeigt die Zusammenstellung von Messungen, die für eine vergleichende Auswertung vorhanden sind. Weiterhin wurden die bekannten Randbedingungen für diese Messungen aufgeführt. Diese Randbedingungen stellen begleitende Informationen zum Griffigkeitsmesswert dar. Kriterium für die Verwendbarkeit

der Messungen ist, dass zum Zeitpunkt der Durchführung annähernd Vergleichbedingungen im Sinne der DIN ISO 5725 vorgelegen haben.

Nr.	Untersuchung	Untersuchungsbezeichnung
1	Untersuchung zur Präzision des Messverfahren SCRIM, TUD 2001	RV_09-2001
2	Vergleichsuntersuchung SCRIM und GripTester auf unterschiedlichen Deckschichtarten	VM_04-176
3	Internationale Vergleichsuntersuchungen zwischen Deutschland, Dänemark und Niederlande, 1996	VV_G-NL-DK_1996
4	Correlation of SCRIM with the Mark 2 GripTester 2004, TRL	Comp_SC_GT2_2004
5	Untersuchungen zur Präzision des Messverfahrens SCRIM und GripTester, TUD 2002	RV_08-2002
6	Untersuchungen zur Präzision des Messverfahrens GripTester, TUD 2002	RV_09-2002
7	Vergleichsuntersuchungen zwischen SCRIM und GripTester, BAST, BauboDA und Mechatronic, ca. 1996	VM_Fricke_1996
8	Vergleichende Messungen zwischen SCRIM und GripTester auf Bundesfernstraßen der BuB Karlsruhe	VU_BKA_2001

Tabelle 4: Übersicht zu den vorliegenden vergleichenden Untersuchungen zwischen SCRIM und GripTester zusammen mit messbegleitenden Informationen

Es wird (ohne Nachweis) davon ausgegangen, dass mit dem vorliegenden Datenmaterial möglichst viele Messobjekte gefunden wurden, mit denen das unterschiedliche Verhalten der Griffigkeitsmesssysteme erfasst wurde $\{\Delta M\}$. Die Unveränderbarkeit der Messobjekte als Voraussetzung für die Vergleichbarkeit musste angenommen werden $\{\Delta M\}$.

In der Regel wurden auf den Strecken keine simultanen Messungen vorgenommen, das heißt zwischen den Messungen mit der SCRIM und dem GripTester lagen Zeitabschnitte von mehreren Stunden oder Tagen.

Außerdem unterscheiden sich die Messungen in der Anzahl eingesetzter Prüfgeräte und durchgeführter Wiederholmessungen. Hinsichtlich der hier getroffenen Konvention über den richtigen Wert ergeben sich daraus unterschiedliche Zuverlässigkeiten hinsichtlich der Repräsentanz des wahren Wertes. Bei der Datenaufbereitung werden deshalb die Daten unterschiedlich stark gewichtet.

3.2.2 Datenaufbereitung und Klassendefinition

▼ In Bezug auf die in dieser Arbeit verwendeten Definition des richtigen Wertes sind Messergebnisse, die aus mehreren Wiederholungen ermittelt werden, ‚sicherer‘ als Messergebnisse aus wenigen Wiederholungen. Das trifft ebenso auf Ergebnisse als Mittelwert aus den Messwerten mehrerer Prüfgeräte zu. Messungen, die um systematische Einflüsse korrigiert wurden, werden ebenso als ‚sicherer‘ betrachtet.

Ziel der Datenaufbereitung ist es, die Messwerte unter Berücksichtigung ihrer Randbedingungen aufzubereiten und ihre unterschiedliche Genauigkeit (oder auch Zuverlässigkeit) in der Auswertung zu berücksichtigen.

Die Messergebnisse beziehen sich jeweils auf 100 m–Abschnitte, das heißt auf Messergebnisse, die durch arithmetische Mittelung aus den Messwerten über einen 100 m–Abschnitt ermittelt wurden.

Folgende Schritte werden für die Datenaufbereitung durchgeführt:

- (1) Bestimmung der Zuverlässigkeit der Datensätze mittels messungsbezogener Informationen.
- (2) Bildung von Punktgewichten und Genauigkeitsklassen.
- (3) Einteilung in Datenklassen mittels messobjektbezogener Informationen.

(1) Bestimmung der Zuverlässigkeit der Datensätze mittels messungsbezogener Informationen

Zur Einschätzung der Zuverlässigkeit der Messdaten wird quantifiziert, wie gut ein Messergebnis als Schätzer für den richtigen Wert verwendet werden kann. Sind Informationen zu systematischen Einflüssen bei den Datensätzen bekannt, so kann entweder über bekannte Funktionen eine Korrektur der Messwerte erfolgen oder davon ausgegangen werden, dass eine Korrektur bereits erfolgt ist. Solche Messdaten sollen im Allgemeinen als **hoch** in der Zuverlässigkeit eingestuft werden. Natürlich können auch Fälle auftreten, bei denen Datensätze ohne zusätzliche Information im Einzelfall sehr nahe am richtigen Wert liegen. Diese Datensätze werden trotzdem in ihrer Zuverlässigkeit als **gering** eingeschätzt. Bei der Auswertung steht für diese Annahme aber keine weitere Entscheidungsgrundlage zur Verfügung.

Deshalb wird nach folgendem Grundsatz verfahren:

Es wird angenommen, dass Messdaten mit Vorliegen von vielen messbegleitenden Informationen, die zu einer Korrektur systematischer Abweichungen geführt haben oder hätten, einer höheren Zuverlässigkeit zuzuordnen sind. $\{\Delta M\}$.

Unterschieden wird in **messungsbezogene** Informationen und in **messobjektbezogene** Informationen. Während die messungsbezogenen Informationen (z.B. Temperaturangaben) zur Einschätzung der Zuverlässigkeit verwendet wurden, werden die messobjektbezogenen Informationen zur Klassenbildung verwendet (z.B. Texturmerkmale, Sollmessgeschwindigkeit). Die Trennung ist jedoch nicht exakt möglich. Die Messgeschwindigkeit kann sowohl messungsbezogen als auch messobjektbezogen aufgefasst werden. Wenn Geschwindigkeitsangaben vorhanden sind, dann ist auch von einer Geschwindigkeitskorrektur ausgegangen worden. Die Abbildung 10 zeigt die Verwendung der messbegleitenden Informationen zur Bestimmung der Zuverlässigkeit und der Klassenbildung.

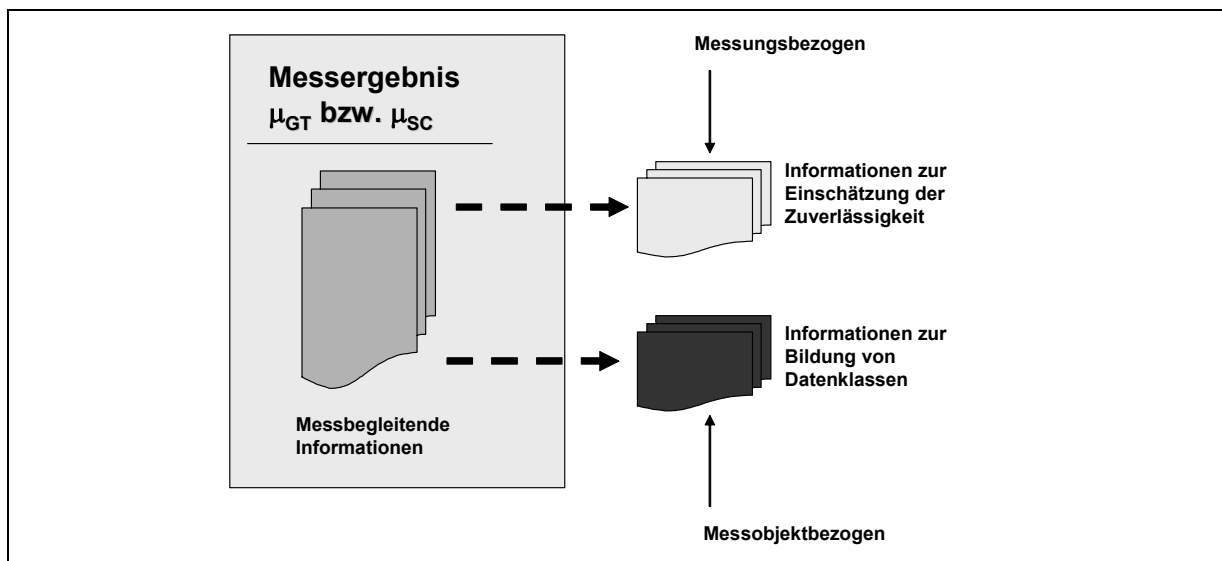


Abbildung 10: Splittung der messbegleitenden Informationen in Informationen zur Einschätzung der Zuverlässigkeit und Informationen zur Gruppenbildung

Die oben getroffene Annahme auf Zuverlässigkeit der Messdaten kann auch dazu führen, dass Messdaten mit hoher Genauigkeit aber geringerer Informationsdichte als weniger zuverlässig eingestuft werden $\{\Delta M\}$. Als Maß für die Zuverlässigkeit wird die Standardabweichung des Ergebnisses verwendet. Je geringer die für einen Datensatz ermittelte Standardabweichung ist, umso höher wird die Zuverlässigkeit der Messdaten eingeschätzt.

a) Einfluss von Geschwindigkeitsabweichungen auf die Messwertzuverlässigkeit Δs_g

Der Griffigkeitsmesswert ist systematisch von der Messgeschwindigkeit abhängig. Mit steigender Messgeschwindigkeit wird eine Verringerung des Messwertes beobachtet und umgekehrt mit geringerer Geschwindigkeit eine Vergrößerung. Systematische Veränderungen der Geschwindigkeit bewirken systematische Veränderungen der Messwerte.

Zufällige Veränderungen der Geschwindigkeit führen zu zufälligen Veränderungen der Messwerte.

In Deutschland liegen die üblichen Sollmessgeschwindigkeiten bei 40, 60 oder 80 km/h. Bei der Griffigkeitsmessung wird die momentane Messgeschwindigkeit erfasst und dem Griffigkeitsmesswert zugeordnet. Danach können jedem Griffigkeitsmesswert die Abweichungen von der Sollmessgeschwindigkeit und damit die systematischen Abweichungen der Griffigkeitsmesswerte zugeordnet werden. Nicht messbare bzw. nicht erfassbare Geschwindigkeitsabweichungen bewirken eine nicht korrigierbare Beeinflussung des Griffigkeitsmesswertes und erhöhen die Varianz unter Wiederholbedingungen.

Der empirisch ermittelte funktionale Zusammenhang zwischen dem Griffigkeitsmesswert und der Messgeschwindigkeit erlaubt bei exakt gemessenen Geschwindigkeiten eine Korrektur des Griffigkeitsmesswertes. In den Arbeitsanweisungen bzw. Prüfvorschriften sind dazu Korrekturfunktionen angegeben. Aktuelle Prüfvorschriften schränken die maximal zulässige Spannweite zwischen der Sollmessgeschwindigkeit und der tatsächlichen Messgeschwindigkeit ein. Nach ARS 24/ 2003 sind Messwerte der SCRIM nach TP Griff-StB (SCRIM) nur dann gültig, wenn die Toleranz von ± 4 km/h zur Sollmessgeschwindigkeit nicht überschritten wird.

Für die Beurteilung der Zuverlässigkeit von Messwerten älterer Messungen **ohne Geschwindigkeitsangabe** wird folgende Überlegung durchgeführt:

Der Fahrer hat während der Messung über den Tachometer permanent die Information über die Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Zusätzlich hat er die Möglichkeit, über die Geschwindigkeitserfassung des Messsystems eine Rückmeldung über die tatsächliche Messgeschwindigkeit zu erhalten. Durch die Möglichkeit der einfachen und permanenten Geschwindigkeitsüberwachung ist davon auszugehen, dass auch bei älteren Messfahrten die Abweichungen von der Sollmessgeschwindigkeit schnell erkannt und korrigiert wurden. Es wird deshalb angenommen, dass die Spannweite τ für einzelne 10 m bzw. 20 m-Messwerte von ± 6 km/h auch bei älteren Messfahrten nicht überschritten wurden. Für eventuell aufgetretene Abweichungen größer ± 6 km/h kann angenommen werden, dass diese Abweichungen vom Fahrer schnell erkannt und korrigiert wurden. Für Messfahrten mit längerfristig größeren Abweichungen wird angenommen, dass diese durch den Fahrer für

ungültig erklärt wurden. Demnach werden die zufälligen Abweichungen der mittleren Geschwindigkeit eines 100 m-Abschnittes geringer sein und werden hier zu $\pm 3 \text{ km/h}$ angenommen. Berücksichtigt sind dabei insbesondere die Fälle, bei denen der Fahrer auf Grund seiner Beobachtungen der Meinung ist, er fahre die richtige Geschwindigkeit (Ungenauigkeit des Tachos). Wenn das Messsystem nur knapp über oder unter der Sollmessgeschwindigkeit liegt, fällt es dem Fahrer bei Orientierung nach Tachometer zunehmend schwerer, diese Abweichung zu erkennen und zu korrigieren. Unter der Voraussetzung, dass die Verteilung der Messgeschwindigkeit normal verteilt ist, lässt sich die mittlere Standardabweichung der Messgeschwindigkeit berechnen (MERKBLATT RINGVERSUCH TEIL 1):

$$\tau = 1,5\sigma_v \quad 3.2-1$$

$$\sigma_v = \frac{\tau}{1,5} = \frac{3}{1,5} [\text{km/h}]$$

$$\underline{\sigma_v = 2,0 [\text{km/h}]}$$

τ – Spannweite, σ_v - Standardabweichung

Über die mittlere Standardabweichung und über den Zusammenhang zwischen Griffigkeitswert und Messgeschwindigkeit lässt sich die Auswirkung auf die Varianz des Messwertes ermitteln. Dazu wird die Standardabweichung der Messgeschwindigkeit über den Zusammenhang zwischen Griffigkeitsmesswert und Messgeschwindigkeit in eine Streuung des Griffigkeitsmesswertes transformiert. Für den Zusammenhang zwischen Messwert und Messgeschwindigkeit wird ein mittlerer proportionaler Faktor von $0,0040 \text{ [}^1/\text{km/h}]$ festgelegt. Dieser Faktor wird aus den Angaben zur Messwertkorrektur bei der SCRIM mit 0,0035 nach TP Griff-StB SCRIM, 0,0025 nach ARS 24/ 2003 für die SCRIM und den Untersuchungen der TU Darmstadt für den GripTester mit 0,0042 als mittlerer allgemeingültiger Ansatz für alle Griffigkeitsmesssysteme verwendet.

$$\Delta s_g = 0,0040 \left[\frac{1}{\text{km/h}} \right] * \sigma_v \quad 3.2-2$$

$$\Delta s_g = 0,0040 \left[\frac{1}{\text{km/h}} \right] * 2,0 [\text{km/h}] \quad 3.2-3$$

$$\underline{\Delta s_g = 0,0080 [-]}$$

Die mittlere Standardabweichung der Messwerte infolge zufällig schwankender Messgeschwindigkeit wird somit bei Messfahrten ohne Geschwindigkeitsangaben auf $\Delta s_g = 0,008 [-]$ festgelegt.

b) Einfluss abweichender Messspur auf die Messwertzuverlässigkeit Δs_u

Bei Messungen der Griffigkeit sind die Vergleichbedingungen wegen der besonderen Messsituation oft nicht erfüllt. Bei der linienhaften Erfassung der Griffigkeit entlang einer gewählten Messspur wird der Griffigkeitszustand orthogonal zur Messspur nicht erfasst. Gleichzeitig kann verfahrensbedingt nicht gewährleistet werden, dass bei Vergleichsmessungen exakt dieselbe Messspur befahren wird. Es liegen damit streng genommen keine Vergleichbedingungen vor. Es ist bekannt, dass die Griffigkeit quer zur Fahrtrichtung keine konstante Größe ist. In Analogie zur Ausprägung geometrischer Veränderungen der Straßenoberfläche durch die Verkehrsbelastung als Spurrinnen, bilden sich durch die Verkehrsbelastung Straßenbereiche mit geringen und höheren Griffigkeiten.

In Abbildung 11 ist eine Darstellung für einen hypothetischen Griffigkeitsverlauf quer zur Fahrtrichtung dargestellt. Betrachtet man die Straßenoberfläche als Ebene im zweidimensionalen Koordinatensystem, in dem x die Querrichtung und y die Längsrichtung bezeichnet, so ist der Griffigkeitszustand eines beliebigen Punktes in einer vereinfachten 2-dimensionalen Betrachtung auf der Fahrbahn beschrieben durch die Griffigkeit am geometrischen Punkt (x,y) in y-Richtung (Längsrichtung) und in x-Richtung (Querrichtung). Die x-Richtung ist in Abbildung 11 dargestellt als Abstand zum Fahrbahnrand.

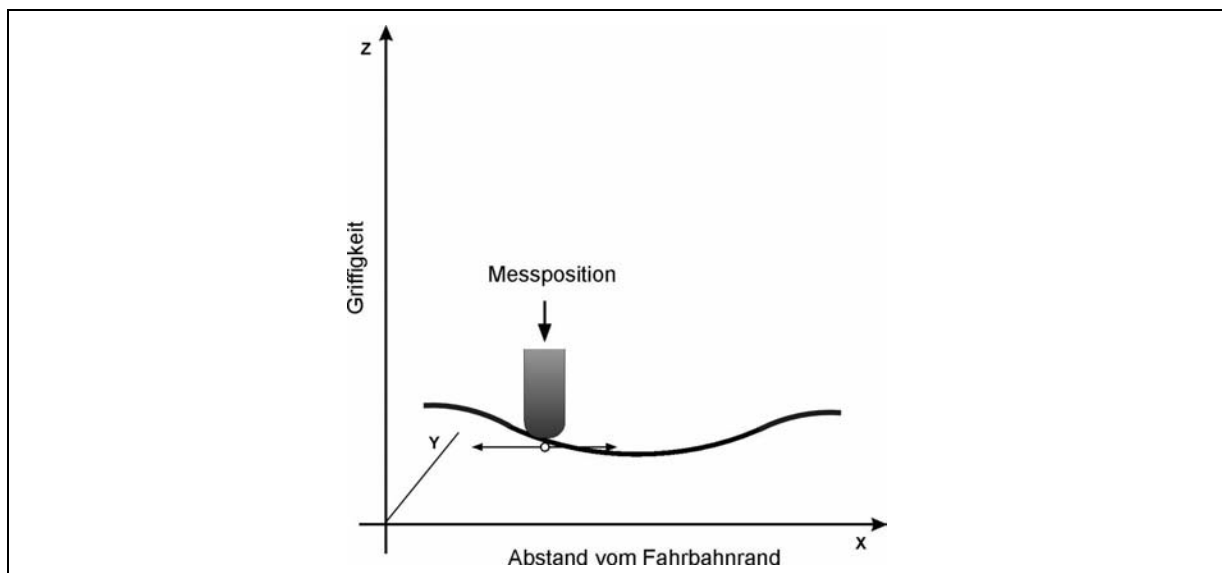


Abbildung 11: Darstellung eines hypothetischen Griffigkeitsverlaufs quer zur Mess- und Fahrtrichtung

Bei Messungen vor Inkrafttreten des ARS 24/2003 wählte der Messfahrer die Messspur und damit die Messposition des Messrades frei im Straßenraum und somit subjektiv nach seiner persönlichen Einschätzung. Ziel war es, die Messungen im Bereich der geringsten Griffigkeit durchzuführen. Gestützt auf seine persönliche Erfahrung definiert der Messfahrer die Messspur selbst. Wiederholfahrten aus Ringversuchen zeigten, dass dabei die Fahrer ihre bereits gewählte Messspur gut reproduzieren konnten. Aber es wurden keine identischen Messpositionen zwischen den verschiedenen Fahrern erreicht. Mit dem ARS werden die Messspuren in einem festen Abstand zur Straßenrandmarkierung festgelegt. Ziel dabei ist es, die Wiederhol- und Vergleichbarkeit der Messfahrten zu verbessern. Um dies zu erreichen, wurden Hilfsmittel zur Spurunterstützung eingeführt. Für Messungen nach ARS 24/ 2003 wird eine Messspur in festem Abstand (bei zweibahnigen Straßen in der Regel 70 cm) zur Fahrbahnrandmarkierung festgelegt und ist damit dem Fahrer vorgegeben. Zur Überprüfung der Messspurlage dient ein opto-elektronisches **Spurführungssystem (SFS)**. Mit Einführung des SFS wurde eine Verbesserung der Spurlage erreicht. Aber auch hier sind keine identischen Messpositionen zu erwarten, Spurabweichungen kleiner ± 15 cm werden toleriert.

Für Messfahrten innerhalb der tolerierbaren Spurabweichungen werden die ermittelten Messwerte als gültig akzeptiert. Tolerierte Spurabweichungen und damit Messwerte tolerierter Messpositionen werden nicht differenziert. Im Ringversuch 2002 zur Präzision des Messsystems SCRIM wurde gezeigt, dass durch das SFS eine Verringerung der Vergleichstandardabweichung s_R bzw. σ_R erreicht werden konnte. Offensichtlich ergab sich durch das SFS eine verbesserte Übereinstimmung der Messpositionen. Messergebnisse ohne SFS unterliegen unter Vergleichbedingungen höheren Schwankungen und damit Standardabweichungen.

Unter der Annahme, dass der Einfluss des SFS auf die Streuung unabhängig von anderen beliebigen Einflüssen T ist, gilt für den Korrelationskoeffizienten $\rho_{\text{SFS}, T} = 0$.

Beschreibt $\sigma_{R,u}$ die Standardabweichung unter Vergleichbedingungen für Fahrten ohne Nutzung des Spurführungssystems und $\sigma_{R,g}$ die Standardabweichung unter Vergleichbedingungen für Fahrten mit Nutzung des SFS, dann erhält man:

$$\begin{aligned}\sigma_{R,u}^2 &= \Delta s_u^2 + \sigma_{R,g}^2 \\ \Delta s_u &= \sqrt{\sigma_{R,u}^2 - \sigma_{R,g}^2} .\end{aligned}\tag{3.2-4}$$

Der Unterschied Δs_u entspricht dem Einfluss des SFS auf die Präzision des Prüfverfahrens. Der Schätzwert Δs_u wird aus den Ergebnissen des Ringversuches zur Präzisionsermittlung der SCRIM 2002 gebildet. Für die Standardabweichung unter Vergleichbedingungen bei

Fahrten **mit SFS** wurde ein Wert von 0,0191 und bei Fahrten **ohne SFS** ein Wert von 0,0205 ermittelt. In obige Gleichung 3.2-4 eingesetzt ergibt sich:

$$\Delta s_u = \sqrt{(0,0205)^2 - (0,0191)^2}$$

$$\Delta s_u = 0,0075[-]$$

Dem Spurführungssystem wird damit ein Einfluss auf die Präzision von 0,0075 [-] beigemessen. Da es sich hierbei um keine tatsächliche, sondern nur um eine scheinbare Messobjektveränderung handelt, soll sie als ‚statistische Messobjektstreuung‘ bezeichnet werden.

c) Einfluss der Temperatur ΔT auf die Messwertzuverlässigkeit

Griffigkeitsmessungen sind temperaturabhängig. Mit steigenden Temperaturen werden geringere Griffigkeitswerte und bei geringeren Temperaturen höhere Griffigkeitswerte ermittelt. In der TP Griff-StB (SCRIM) 2001 und in der Arbeitsanleitung für Griffigkeitsmessungen mit dem LFC-Messverfahren (GripTester) sind daher Messwertkorrekturen in Abhängigkeit der Fahrbahntemperatur (Fb-T) angegeben. Die Messwertkorrektur wird über eine Abweichung von der Bezugstemperatur (Fahrbahn von 20°C) vorgenommen. Beim Prüfverfahren SCRIM wird (*derzeit*) diese Korrektur in Form eines Stufenmodells vorgenommen. Beim Prüfverfahren GripTester wird eine Korrektur um 0,003 [1/1°C] angegeben (Arbeitsanleitung GripTester). Werden Vergleichsmessfahrten ohne Informationen über messbegleitend erfasste Temperaturen und folglich ohne Temperaturkorrekturen betrachtet, muss von temperaturbedingten Abweichungen zu den tatsächlichen Werten ausgegangen werden.

Temperaturkorrekturmodell SCRIM

Zum Zeitpunkt der Datengewinnung war das Stufenmodell der SCRIM nach TP Griff-StB (SCRIM) 2001 aktuell. Im Stufenmodell werden die Messwerte bei Temperaturabweichungen von je voll 10 K Temperaturdifferenz von der Bezugstemperatur korrigiert. Die Bezugstemperatur beträgt 20°C und bezieht sich auf die Fahrbahnoberfläche.

Messwertkorrektur	- 0,01 [-]	Fahrbahntemperatur < 10°C
Messwertkorrektur	+ 0,01 [-]	Fahrbahntemperatur zwischen 30°C und 40°C
Messwertkorrektur	+ 0,02 [-]	Fahrbahntemperatur ≥ 40°C

Das Stufenmodell führt dazu, dass Temperaturabweichungen $< 10^{\circ}\text{C}$ nicht korrigiert werden (mussten). Fahrbahnoberflächen mit 29°C hatten also keine Korrekturen zur Folge, während dazu beim nur geringen Fahrbahntemperaturzuwachs um 1°C von 29 auf 30°C eine Korrektur notwendig war. Diese Unstetigkeit in der Korrekturfunktion findet sicher keine physikalisch technische Entsprechung und lag sicher im Bestreben, ein einfaches Korrekturmodell zu entwickeln.

Daher wurde ein neues lineares Korrekturmodell für die Messwerte der SCRIM TP Griff-StB (SKM) 2007 diskutiert. Die Messwertkorrektur erfolgt derzeit linear unter zusätzlicher Beachtung der Wassertemperatur.

$$m_{V,T} = m_V + (T_{\text{Wasser}} - 20) * 0,0025 + 0,0012 * (T_{Fb} - 20) \quad 3.2-5$$

Temperaturkorrekturmodell GripTester

Das Korrekturmodell für den GripTester vermeidet dieses Problem, indem eine kontinuierliche Messwertkorrektur mit einer linearen Korrekturfunktion vorgenommen wird. Messwerte werden derzeit nach folgender Gleichung korrigiert. Auch hier beträgt die Bezugstemperatur 20°C .

$$m_{V,T} = m_V - 0,003 * (20 - T_{Fb}) \quad 3.2-6$$

Aber auch dieses Modell hat Probleme in der Praktikabilität. Messungen bei einer Fahrbahnoberflächentemperatur von 45°C bedeuten eine Temperaturabweichung von 25°C . Mit dem existierenden Korrekturmodell für den GripTester ist danach eine Korrektur um $0,003 * (45 - 20) = 0,075$ notwendig. Dieser Korrekturwert erscheint zu hoch. Beim Prüfverfahren SCRIM sind lediglich Korrekturen um $0,02$ notwendig. Beide Korrekturmodelle unterscheiden sich also in ihrer Modellstruktur und den darin enthaltenen Werten für die Parameter und damit in den Zahlenwerten ihrer Ergebnisse.

Beliebig ausgewählte Messdaten werden in der Regel nicht bei 20°C Fahrbahntemperatur ermittelt worden sein. Liegen keine Angaben zu den tatsächlichen Temperaturverhältnissen vor, weichen die Messergebnisse um einen unbekannten, temperaturbedingten Anteil vom wahren Wert ab. Neben den prüfbedingten Abweichungen der Verfahren ist daher zusätzlich eine Temperaturabweichung in die Fehlergleichung einzubeziehen.

$$\mu_{SC,i} = \xi_i + v_i + t_{SC,i} \quad 3.2-7$$

$$\mu_{GT,i} = \eta_i + w_i + t_{GT,i} \quad 3.2-8$$

Wegen der zeitlichen Nähe der Vergleichsmessungen wird $t_{SC,i} = t_{GT,i}$ angenommen. Da die Abweichung von der Bezugstemperatur nicht bekannt ist, wird zunächst der Wert der Abweichungsglieder $t_{SC,i}$ und $t_{GT,i}$ nicht angegeben. Die auftretenden Abweichungen von der

Bezugstemperatur sind damit nahezu gleich groß. Würden sich die Korrekturmodelle beider Prüfverfahren nicht unterscheiden, so würden die jeweiligen Korrekturglieder $t_{SC,i}$ und $t_{GT,i}$ den gleichen Zahlenwert annehmen. Mit beiden Korrekturgliedern werden die Messwerte hinsichtlich ihrer Annäherung an die richtigen Werte ξ_i und η_i verbessert. Mit dem Ziel der Betrachtung des Verhältnisses von (ξ/η) stellt sich jedoch die Frage, ob die Korrektur um eine nahezu identische Größe bei beiden Messwerten eine wesentliche Veränderung des Verhältnisses bewirkt. Dazu soll eine einheitliche Messwertkorrektur um einen Term c für beide Prüfverfahren betrachtet werden:

$$\frac{x_i}{y_i} = \frac{\xi_i + c}{\eta_i + c} \quad 3.2-9$$

Aus der Gleichung ist zu erkennen, dass für sehr kleine c_i das Verhältnis der Werte (x_i/y_i) nur unwesentlich zu (ξ_i/η_i) verschieden ist. Durch den Temperatureinfluss sind nur geringe Einflüsse auf die Messwertkorrekturen zu erwarten. Deshalb wird für das Gesamtkonzept des Verfahrensvergleichs die Berücksichtigung einer fehlenden Temperaturkorrektur nicht als notwendig erachtet. Auf die Verwendung eines Korrekturgliedes Δs_T für Temperaturabweichungen wird deshalb verzichtet.

d) Einfluss der Anzahl m an Messwiederholungen auf die Messergebniszuverlässigkeit

Werden Messergebnisse durch Mittelwertbildung aus $m > 1$ Messwerten unter Wiederholbedingungen ermittelt, so ist die Streuung $\sigma_{\bar{x}}$ dieser Mittelwerte geringer als die Streuung σ_x der einzelnen Messwerte. Die Streuung $\sigma_{\bar{x}}$ eines solchen Mittelwertes \bar{x} kann aus der Streuung σ_x der einzelnen Messwerte abgeschätzt werden, wobei m die Anzahl der durchgeführten Messungen unter Wiederholbedingungen ist. Es gilt:

$$\sigma_{\bar{x}}^2 = \frac{\sigma_x^2}{m}. \quad 3.2-10$$

Beim vorliegenden Datenmaterial ist die Anzahl m der Messungen je Prüfergebnis unterschiedlich groß. Aus der unterschiedlichen Anzahl der Messwiederholungen je Messergebnis resultiert eine unterschiedliche Größe der Mittelwertstreuung.

Für die vorhandenen Daten mit unterschiedlicher Anzahl an Messwiederholungen sollen die Streuungen für die Mittelwerte aus den bekannten Standardabweichungen unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen ermittelt werden. In Ringversuchen zur Ermittlung der Präzision der Prüfverfahren SCRIM und GripTester wurden die Standardabweichungen unter Wiederholbedingungen siehe Tabelle 5 ermittelt.

$s_{r,SC}$ SCRIM (Ringversuch 2002)	$s_{r,GT}$ GripTester (Ringversuch 2004)
0,0089	0,0154

Tabelle 5: Aus Ringversuchen ermittelte Standardabweichung unter Wiederholbedingungen für SCRIM und GripTester für $m = 2$

Die in Tabelle 5 angegebenen Werte für die Standardabweichung unter Wiederholbedingungen σ_r bzw. s_r beziehen sich jeweils auf die Messergebnisse, die als arithmetisches Mittel aus zwei Einzelwerten ($m = 2$) gebildet wurden. Die Varianzen von Mittelwerten, die sich aus m Einzelwerten berechnen lassen, werden mit σ_m^2 bezeichnet und nach folgender Gleichung berechnet:

$$\sigma_m^2 = \frac{2\sigma_r^2}{m} \quad \text{bzw.} \quad s_m^2 = \frac{2s_r^2}{m}. \quad 3.2-11$$

Damit wird die Reduzierung der Mittelwertstreuung in Abhängigkeit von „ m “ Messwiederholungen berücksichtigt.

e) Einfluss der Verwendung mehrerer Prüfgeräte (Prüfstellen) q auf die Messwertzuverlässigkeit

Die Messwerte eines Prüfgerätes streuen um deren Erwartungswert μ . Obwohl verschiedene Geräte auf dem gleichen Messprinzip beruhen und die Messwerte nach dem gleichen Prüfverfahren ermittelt werden, ist in der Regel der Erwartungswert dieser Prüfgeräte mit $\mu_1, \mu_2 \dots \mu_q$ unterschiedlich. Die beobachtbare Differenz zwischen den Mittelwerten ist ein Schätzmaß für die systematischen Abweichungen der Prüfgeräte untereinander. Da der Griffigkeitsmesswert ein durch das Prüfverfahren definiertes Prüfmerkmal ist, muss auch der richtige Wert (DIN 55 350) über das Prüfverfahren definiert werden. Als richtiger Wert wird der Wert vereinbart, der als Mittelwert aus den Messungen aller Prüfgeräte q eines Prüfverfahrens gebildet wird. Die systematische Abweichung der einzelnen Prüfgeräte (bzw. Prüfstellen) stellt die Differenz zwischen dem Erwartungswert des Prüfgerätes und dem richtigen Wert dar.

In Ringversuchen wird die Streuung σ_L^2 zwischen den Prüfstellen ermittelt. Nach dem Merkblatt für die statistische Auswertung von Prüfergebnissen Teil 4 ergibt sich die Streuung σ_R^2 additiv aus der Streuung σ_r^2 und der Streuung zwischen den Prüfstellen, also:

$$\sigma_R^2 = \sigma_L^2 + \sigma_r^2. \quad 3.2-12$$

Somit gilt:

$$\sigma_L^2 = \sigma_R^2 - \sigma_r^2. \quad 3.2-13$$

bzw. für die empirischen Parameter

$$s_L^2 = s_R^2 - s_r^2 \quad 3.2-14$$

Die Standardabweichungen unter Wiederholbedingungen sind in Tabelle 5 enthalten. Die in Tabelle 6 angegebenen Standardabweichungen unter Vergleichbedingungen wurden aus denselben Ringversuchen ermittelt.

$s_{R,SC}$ SCRIM (Ringversuch 2002)	$s_{R,GT}$ GripTester (Ringversuch 2004)
0,0191	0,0228

Tabelle 6: Mittlere Standardabweichung unter Vergleichbedingungen für SCRIM und GripTester

Nach obiger Gleichung 3.2-14 ergibt sich die Streuung zwischen den Prüfstellen zu:

$s_{L,SC}$ SCRIM (Ringversuch 2002)	$s_{L,GT}$ GripTester (Ringversuch 2004)
0,0176	0,0168

Tabelle 7: Mittlere Standardabweichung zwischen den Prüfstellen für SCRIM und GripTester

Beim vorliegenden Datenmaterial ist teilweise unbekannt, mit welchem Prüfgerät die Messwerte ermittelt wurden. Damit kann den Messdaten keine systematische Prüfstellenabweichung zugeordnet werden. Die vorhandenen, aber unbekannten Abweichungen eines Prüfgerätes vom richtigen Wert werden deshalb als Zufallsgröße aufgefasst.

Wird ein Messergebnis aus den Messwerten von q Prüfstellen durch Mittelwertbildung bestimmt, so ist zu erwarten, dass das Ergebnis weniger stark um den richtigen Wert streut als die Ergebnisse der einzelnen Prüfgeräte. Die resultierende Streuung des Messergebnisses $s_{L,q}^2$ berechnet sich dann mit:

$$s_{L,q}^2 = \frac{s_L^2}{q} \quad 3.2-15$$

f) Berechnung der resultierenden Messergebnisabweichung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Einflüsse auf die Messwertstreuung einzeln erläutert und eine Abschätzung der Größe dieser Einflüsse auf die Messwertstreuung vorgenommen. Unter der Voraussetzung, dass zwischen diesen Einflüssen keine Korrelation besteht, kann von einem mehrdimensionalen orthogonalen System von Einflüssen ausgegangen werden. Die resultierenden Varianzen $s_{GT,k}^2$ bzw. $s_{SC,k}^2$ ergeben sich dann zu:

$$s_{Gerät;k}^2 = \Delta s_g^2 + \Delta s_u^2 + \frac{2s_{Gerät;r}^2}{m} + \frac{s_{Gerät;L}^2}{q} \quad 3.2-16$$

$$s_{Gerät;k} = \sqrt{\Delta s_g^2 + \Delta s_u^2 + \frac{2s_{Gerät;r}^2}{m} + \frac{s_{Gerät;L}^2}{q}} . \quad 3.2-17$$

Wobei für den Index Gerät der GripTester und die SCRIM eingesetzt wird. In Tabelle 8 sind einzelne Untersuchungen für GripTester und SCRIM zusammengefasst. Über die jeweiligen Randbedingungen während der Messungen werden die konkreten Streuungsanteile für die Messwerte angegeben. Aus den Streuungsanteilen werden die resultierenden Ergebnisstreuungen entsprechend den Modellannahmen berechnet.

		GripTester				SCRIM			
K	Untersuchung	Randbedingungen		Stand.ab- weichung	Result. Streuung $s_{GT, k}$	Randbedingungen		Stand.ab- weichung	Result.- Streuung $s_{SC, k}$
1	RV_09-2001	mit 1 Gerät und je 2 ungeführten und nicht geschwindigkeits- korrigierten Messfahrten	$s_{r,m}$	0,0154	0,0243	mit 6 Geräten und je 2 Messfahrten, Messfahrten ungeführt, geschwindigkeits- korrigiert	$s_{r,m}$	0,0089	0,0137
			Δs_g	0,0040			Δs_g	-	
			Δs_u	0,0075			Δs_u	0,0075	
			Δs_L	0,0168			Δs_L	0,0072	
2	VM_04-176	mit 1 Gerät Einzelfahrten ohne Wiederholung und nicht geführten und nicht geschwindigkeits- korrigierten Messdaten	$s_{r,m}$	0,0218	0,0288	mit 1 Gerät Einzelfahrten ohne Wiederholung und nicht geführten und nicht geschwindigkeits- korrigierten Messdaten	$s_{r,m}$	0,0126	0,0233
			Δs_g	0,0040			Δs_g	0,0040	
			Δs_u	0,0075			Δs_u	0,0075	
			Δs_L	0,0168			Δs_L	0,0176	
3	VV_G-NL- DK_1996	mit 1 Gerät und je 3 Messfahrten, Messfahrten ungeführt, Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur nicht bekannt	$s_{r,m}$	0,0126	0,0227	mit 1 Gerät und je 3 Messfahrten, Messfahrten ungeführt, Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur nicht bekannt	$s_{r,m}$	0,0073	0,0209
			Δs_g	0,0040			Δs_g	0,0040	
			Δs_u	0,0075			Δs_u	0,0075	
			Δs_L	0,0168			Δs_L	0,0176	
4	Comp_SC- GT2_2004	7 Geräte und je 4 Messfahrten, Messfahrten ungeführt,	$s_{r,m}$	0,0109	0,0152	mindestens 2 Geräte mit unbekannter Messfahrtenzahl,	$s_{r,m}$	0,0089	0,0175
			Δs_g	0,0040			Δs_g	0,0040	

		GripTester				SCRIM			
K	Untersuchung	Randbedingungen		Stand.ab- weichung	Result. Streuung $s_{GT, k}$	Randbedingungen		Stand.ab- weichung	Result.- Streuung $s_{SC, k}$
		Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur nicht bekannt	Δs_u	0,0075		Messfahrten ungeführt, Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur nicht bekannt	Δs_u	0,0075	
			Δs_L	0,0063			Δs_L	0,0124	
5 6	RV_08-2002 und RV_09-2002	5 Geräte und je 6 Messfahrten; Messfahrten geführt, geschwindigkeits- korrigiert und temperaturkorrigiert	$s_{r,m}$	0,0089	0,0116	mit 7 Geräten und je 6 Messfahrten, Messfahrten geführt, geschwindigkeits- korrigiert	$s_{r,m}$	0,0051	0,0084
			Δs_g	-			Δs_g	-	
			Δs_u	-			Δs_u	-	
			Δs_L	0,0075			Δs_L	0,0067	
7	VM_Fricke_1996	1 Messgerät mit 3 Messfahrten; Messfahrten ungeführt, Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur nicht bekannt	$s_{r,m}$	0,0126	0,0227	1 Messgerät mit 3 Messfahrten, Messfahrten ungeführt, Geschwindigkeits- und Temperaturkorrektur nicht bekannt	$s_{r,m}$	0,0073	0,0209
			Δs_g	0,0040			Δs_g	0,0040	
			Δs_u	0,0075			Δs_u	0,0075	
			Δs_L	0,0168			Δs_L	0,0176	
8	VU_BKA_2001	1 Messgerät, 1 Messfahrt, Messfahrten ungeführt, ohne Korrektur	$s_{r,m}$	0,0218	0,0288	1 Messgerät, 1 Messfahrt, Messfahrt ungeführt, geschwindigkeits- korrigiert	$s_{r,m}$	0,0126	0,0229
			Δs_g	0,0040			Δs_g	-	
			Δs_u	0,0075			Δs_u	0,0075	
			Δs_L	0,0168			Δs_L	0,0176	

Tabelle 8: Übersicht zu den Einflüssen und Streuungen vorhandener Untersuchungen und die resultierende Streuungen für GripTester und SCRIM

Die Messergebnisse x_{GTi} von GT und x_{SCi} von SCRIM innerhalb einer Untersuchung werden jeweils zu einem Punkt (x_{SCi}, x_{GTi}) innerhalb der Untersuchung zusammengefasst.

Um die Zuverlässigkeit eines so ermittelten Punktes einzuschätzen, wird eine resultierende Streuung aus den Streuungen der Punktkoordinaten x und y ermittelt. Die resultierende Streuung kann optional als **arithmetisches** oder als **geometrisches** Mittel vereinbart werden. Das geometrische Mittel ergibt nur Sinn bei multiplikativen Verknüpfungen. In der vorliegenden Auswertung wird das arithmetische Mittel gewählt $\{\Delta M\}$. Danach beträgt die resultierende Standardabweichung s_k^2 eines Punktes k in der Untersuchung:

$$s_k^2 = \frac{1}{2} (s_{GT;k}^2 + s_{SC;k}^2). \quad 3.2-18$$

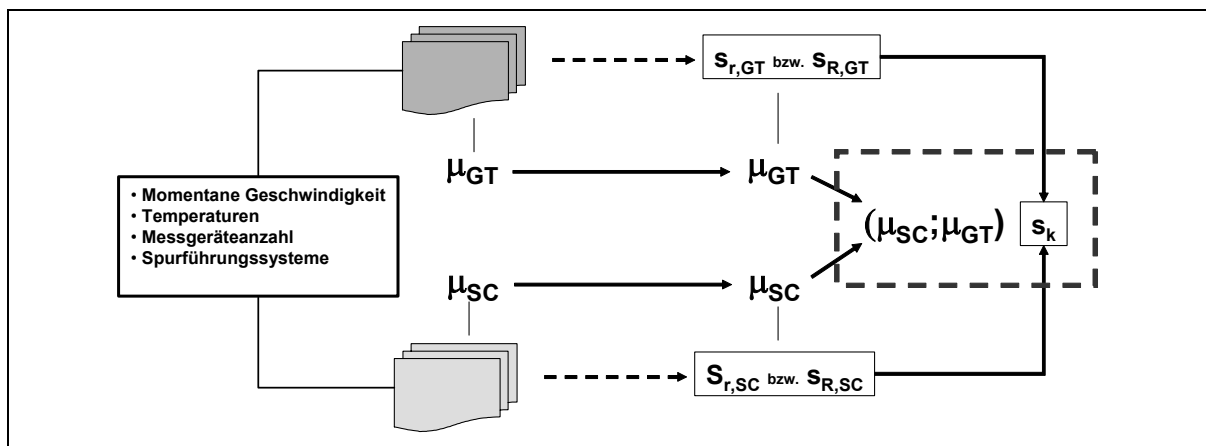


Abbildung 12: Bildung von Punkten aus Messergebnissen und Standardabweichungen

Abbildung 12 zeigt den Datenfluss für die Messergebnisse μ_{GT} und μ_{SC} mit ihren messbegleitenden Daten. Aus den messbegleitenden Daten werden die Streuungsmaße $S_{r,GT}$, $S_{R,GT}$ und $S_{r,SC}$, $S_{R,SC}$ berechnet. Die Streuungsmaße der Messergebnisse werden zur Berechnung einer resultierenden Streuung s_k des Datenpaares (μ_{GT}, μ_{SC}) verwendet. Aus der resultierenden Streuung s_k wird anschließend das Punktgewicht g_k des Wertepaares berechnet.

(2) Bildung von Punktgewichten

Für den angestrebten Vergleich der Messergebnisse und die anschließende Korrelationsbetrachtung sollen die Punkte (x_i, y_i) mit relativ geringer Zuverlässigkeit nicht die gleiche Wichtung haben wie Punkte mit relativ hoher Zuverlässigkeit. Entsprechend der Zuverlässigkeit werden die Messdatensätze in Genauigkeitsklassen zusammengefasst. Es

erscheint sinnvoll, nicht mehr als fünf Genauigkeitsklassen zu definieren, um nicht durch eine zu hohe Klassenanzahl eine höhere Genauigkeit bei der Einteilung vorzutäuschen $\{\Delta M\}$. Die Einteilung erfolgt in Klassen mit:

- (a) **K1** sehr geringer
- (b) **K2** geringer
- (c) **K3** mittlerer
- (d) **K4** hoher
- (e) **K5** sehr hoher Zuverlässigkeit.

Anschließend werden den Klassen Punktgewichte zugeordnet, die dann bei den Regressionsrechnungen berücksichtigt werden. Die Punktgewichte g_k werden entsprechend der Zuordnung zu einer Klasse der Zuverlässigkeit ermittelt.

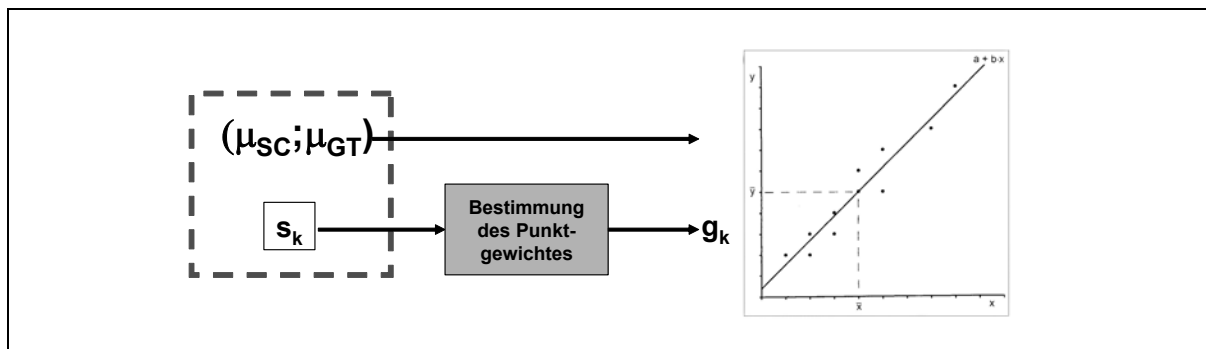


Abbildung 13: Bildung des Punktgewichtes und Verwendung in der Korrelationsbetrachtung

Für das Punktgewicht g_k kann unterschiedlich ermittelt werden. Zur Bestimmung wird entweder die resultierende Streuung s_k oder das Quadrat der resultierenden Standardabweichung s_k verwendet. Beide Möglichkeiten sind zulässig. Es gilt:

$$g_k = \frac{f}{s_k} \quad \text{mit} \quad f = \sum \left(\frac{1}{s_k} \right) \quad \text{bzw.} \quad g_k = \frac{f}{s_k^2} \quad \text{mit} \quad f = \sum \left(\frac{1}{s_k^2} \right). \quad 3.2-19$$

sodass stets $\sum g_k = 1$

Für diese Arbeit wurde die resultierende Standardabweichung s_k verwendet.

Die Normierungskonstante f bewirkt, dass die Summe der Gewichtsanteile g_k den Wert 1 annimmt. Für die vorliegende Auswertung wurde $g_k = f/s_k$ gewählt. Die entsprechenden Anteile sind für jede Untersuchung in Tabelle 9 dargestellt.

k	Untersuchung	Res. Streuung $s_{GT, k}$ (Tabelle 8)	Res. Streuung $s_{SC, k}$ (Tabelle 8)	Res. Streuung der Datenpunkte s_k	Punktgewicht g_k	Anteil Punktgewicht g_k
1	RV_09-2001	0,0243	0,0137	0,0190	3	0,14
2	VM_04-176	0,0288	0,0233	0,0261	2	0,10
3	VV_G-NL-DK_1996	0,0227	0,0209	0,0218	2	0,12
4	Comp_SC-GT2_2004	0,0152	0,0175	0,0164	3	0,16
5	RV_08-2002 und RV_09-2002	0,0116	0,0084	0,0100	5	0,26
6	VM_Fricke_1996	0,0227	0,0209	0,0218	2	0,12
7	VU_BKA_2001	0,0288	0,0229	0,0259	2	0,10
				Summe		1,00

Tabelle 9: Ermittlung der Punktgewichte

In Abbildung 14 sind die mit den g_k - Werten gewichteten Zahlenpaare (x_{SCi}, x_{GTi}) bzw. (x_i, y_i) aller Messungen dargestellt.

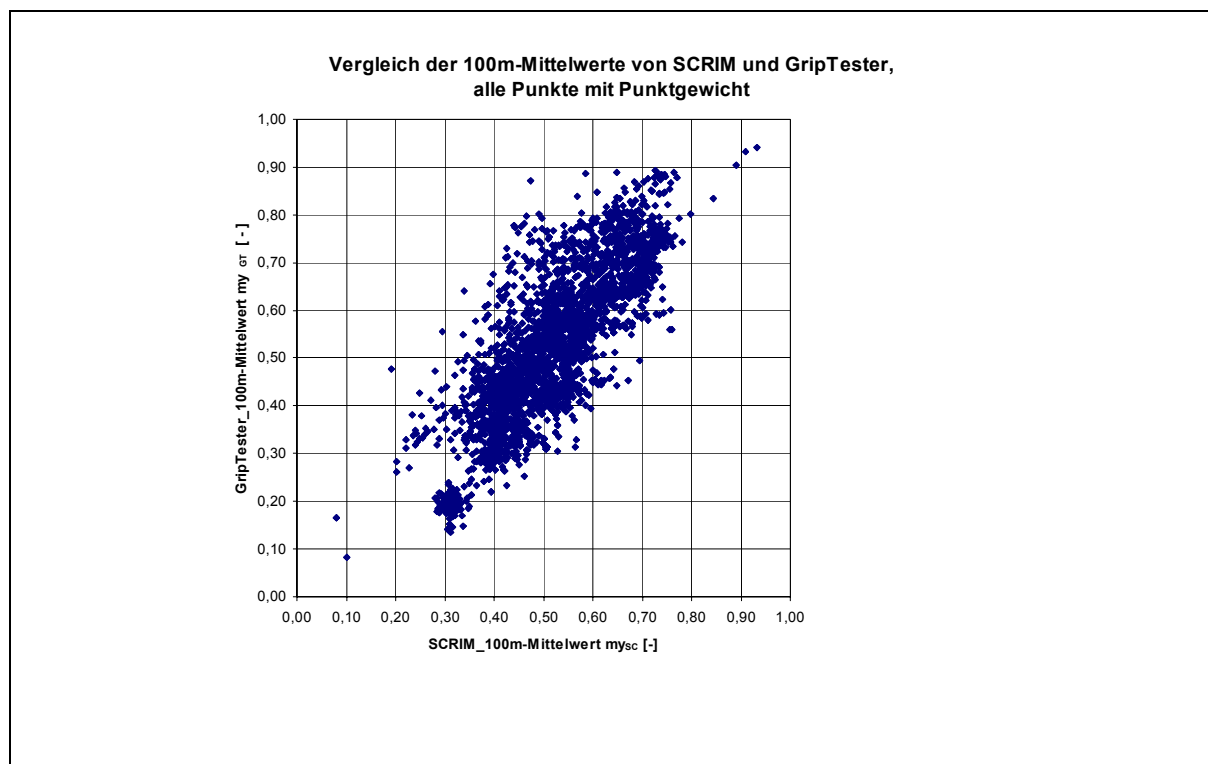


Abbildung 14: Messwertpaare $(x_{sc, i}, x_{GT, i})$ nach Wichtung

Einfluss der Datenwichtung auf die Regressionsparameter

Der lineare Ansatz $y = a + b x$ und der proportionale Ansatz $y = d x$ wurden an den gewichteten und ungewichteten Daten bestimmt und anschließend die Residualstreuung mit dem Ziel beobachtet, die Wirkung der Datenwichtung auf die Residualstreuung zu ermitteln. Dabei wurden zwei Fälle unterschieden.

Im **ersten** Fall werden die Werte auf der X-Achse als determiniert betrachtet und die Streuung in Y-Richtung beobachtet. In diesem Fall wird von der Blickrichtung $X \rightarrow Y$ gesprochen.

Im **zweiten** Fall werden die Werte auf der Y-Achse als determiniert betrachtet und die Streuungen in X-Richtung beobachtet.

Mit Wahl der Blickrichtung werden die Regressionsparameter jeweils am Beispiel des linearen Ansatzes unter Beachtung der Abstände $y_i - (a + b x_i)$ für die Blickrichtung $X \rightarrow Y$ oder $x_i - (a^* + b^* y_i)$ für die Blickrichtung $Y \rightarrow X$ ermittelt.

	ohne Datenwichtung		mit Datenwichtung	
	Blickrichtung $X \rightarrow Y$	Blickrichtung $Y \rightarrow X$	Blickrichtung $X \rightarrow Y$	Blickrichtung $Y \rightarrow X$
Linearer Modellansatz	x	x	x	x
Proportionaler Modellansatz	x	x	x	x

Tabelle 10: **Untersuchte Fälle der Datenbetrachtung mit und ohne Datenwichtung**

Die an unterschiedlichen Klassen ermittelten Regressionsgleichungen sind für den linearen und proportionalen Ansatz in den Anlagen A1 und A2 dargestellt. Zum Vergleich der Regressionsparameter unterschiedlicher Klassen wurden die Regressionsansätze in jeweils ein Diagramm eingetragen. Dazu dienen die Anlage A3 und Anlage A4. Beispielhaft ist in Abbildung 15 der lineare Zusammenhang für die gewichteten Daten dokumentiert.

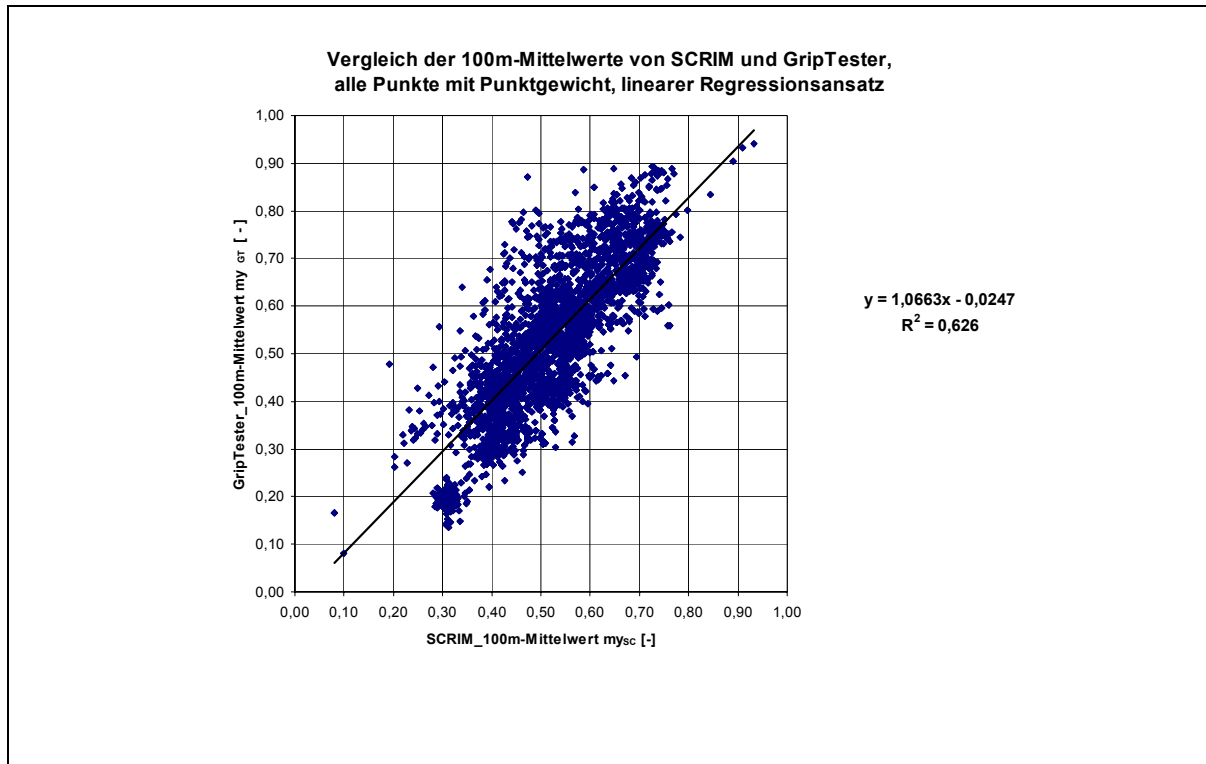


Abbildung 15: Linearer Zusammenhang zwischen den 100m-Mittelwerten der SCRIM und des GripTesters für gewichtete Daten

Wie zu erwarten war, sind die Diagrammbilder der gewichteten und ungewichteten Daten sehr ähnlich. Sie unterscheiden sich lediglich in der Anzahl der übereinander liegenden Punkte.

Beim Vergleich der Regressionsgleichungen bei den Messdaten mit und ohne Datenwichtung fällt auf, dass die Unterschiede in den Parametern für die gewichteten und für die ungewichteten Daten eher gering sind. Mit anderen Worten, es zeigt sich, dass die Einführung des Punktgewichtes nur geringen Einfluss auf die Größe der Regressionsparameter hat. Damit bestätigt sich die Annahme, dass ein zu hoher Aufwand bei der Festlegung der Spannweite der Genauigkeitsklassen für das Punktgewicht nicht gerechtfertigt ist.

In Abbildung 16 ist die Verteilung der Residuen für den linearen Ansatz dargestellt. Für den proportionalen Ansatz befinden sich die zugehörigen Diagramme in Anlage A6.

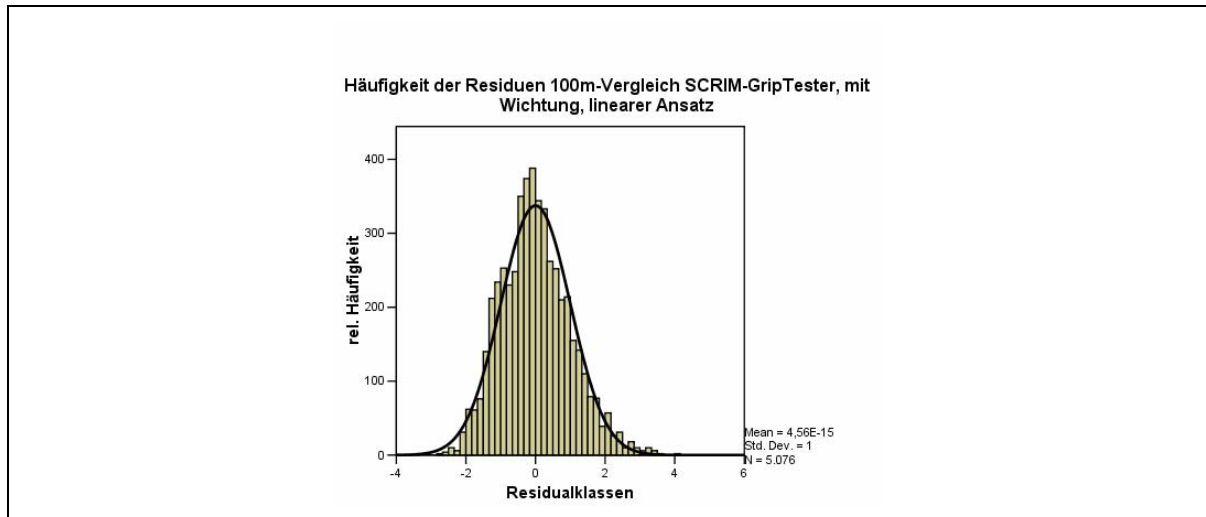


Abbildung 16: Verteilung der nicht erklärten Reststreuungen $\varepsilon_i + w_i$ für den linearen Ansatz

Augenscheinlich lässt sich für den linearen und proportionalen Ansatz eine gute Anpassung der Verteilung (Residualverteilung) an die Normalverteilung erkennen. Zur besseren Darstellung der Normalverteilung werden die Residuen standardisiert, das heißt, zu einer Verteilung mit Erwartungswert **Null** und der Standardabweichung im Wert von **Eins** transformiert. Eine tatsächliche Normalverteilung liegt dann vor, wenn die beobachtete kumulierte Wahrscheinlichkeit der Residuen einer Geraden folgt, siehe Abbildung 17.

Die kumulierte transformierte Wahrscheinlichkeit stimmt demnach nahezu mit einer Geraden überein. Es kann damit von einer Normalverteilung der Residuen ausgegangen werden. Da im Allgemeinen auch die prüfbedingten Abweichungen w bzw. die beobachteten Abstände ω normalverteilt sind, kann folglich auf die Normalverteilung der Modellfehler ε geschlossen werden.

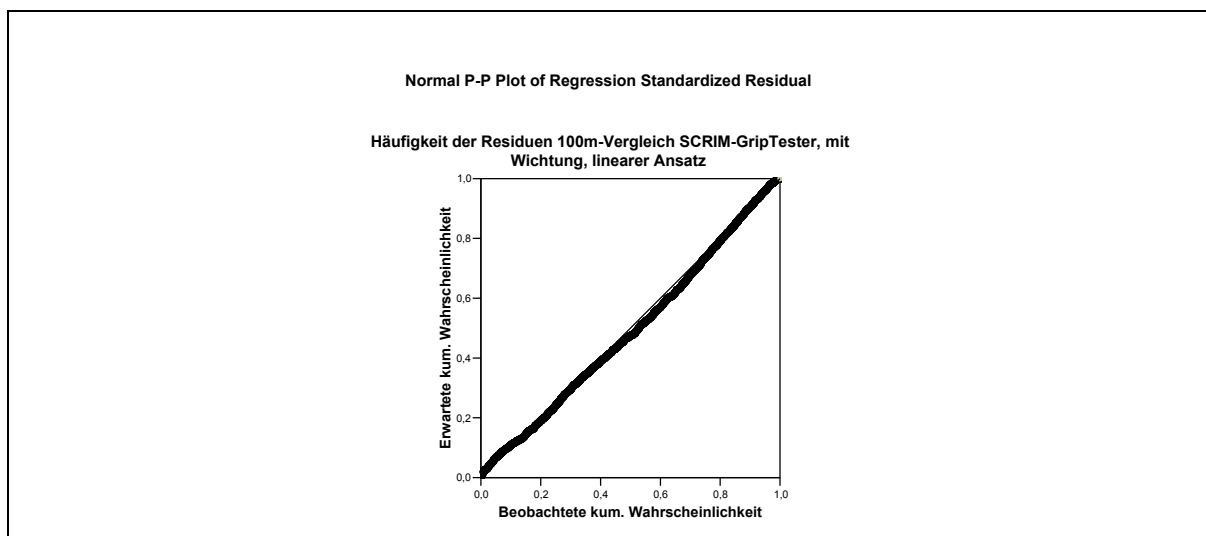


Abbildung 17: Überprüfung der transformierten Residuen auf Normalverteilung

Schlussfolgerung: Der Vergleich zwischen proportionalem und linearem Ansatz auf der Grundlage der Residuenverteilung zeigt keine technisch relevanten Unterschiede, die Größe der Reststreuung beider Modellansätze ist ähnlich hoch. Aus der Residualstreuung kann damit nicht, wie erwartet, der lineare oder proportionale Ansatz ausgeschlossen werden. Deshalb werden beide Ansätze in den weiteren Ausführungen betrachtet.

(3) Einteilung in Datenklassen mittels messobjektbezogener Informationen

Aus den messbegleitenden Informationen zu den Messobjekteigenschaften werden unterschiedliche Gruppen von Messobjekten definiert.

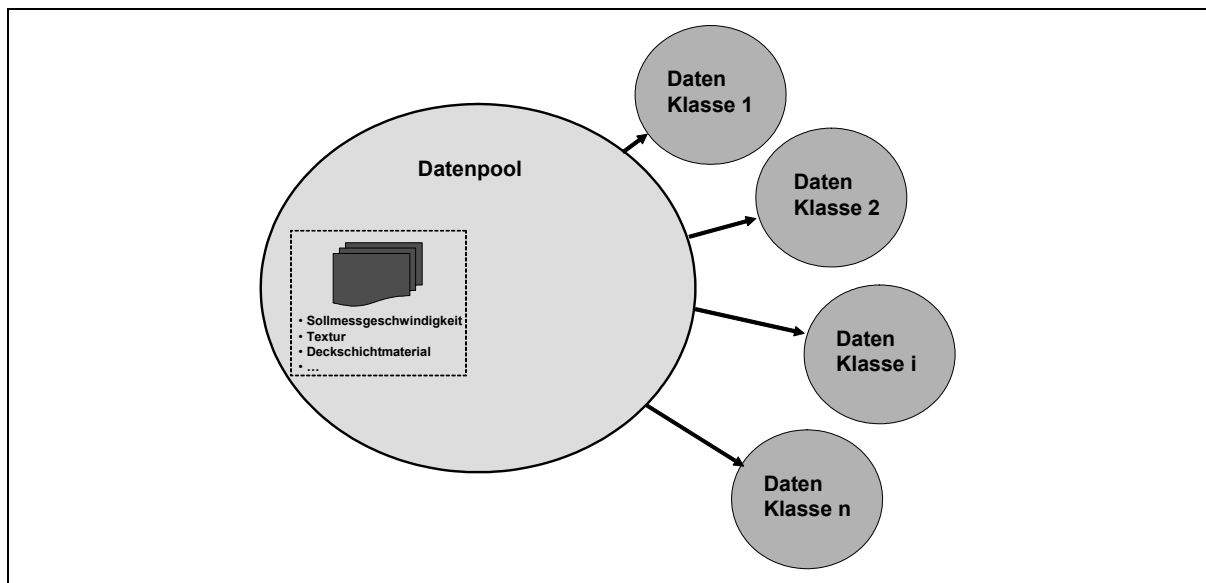


Abbildung 18: Klassen- bzw. Gruppenbildung

Es wird angenommen, dass bei allen Daten die Forderung nach Vergleichbedingungen eingehalten ist. Daher sind die beobachtbaren Unterschiede in den Regressionsgeraden unter den Datenklassen allein die Folge eines spezifischen Verhaltens der Prüfprinzipien gegenüber den Messobjekten einer Grundgesamtheit. Die Messobjekte wurden in Klassen eingeteilt, da die klassenspezifischen Zusammenhangsfunktionen eine geringere Reststreuung erwarten lassen. Man erhält für jede Datenklasse jeweils Parameter für den proportionalen und linearen Ansatz. In der anschließenden Untersuchung werden die Parameter auf signifikante Abweichungen untersucht und festgestellt, ob es signifikante Einflüsse von Messobjekteigenschaften auf den Zusammenhang gibt. Bei der Ermittlung von Zusammenhangsfunktionen muss das Kriterium der Praktikabilität beachtet werden. Funktionen, deren Parameter im allgemeinen ‚Messalltag‘ nicht ermittelt werden können, sind ungeeignet.

Für die Gruppierung der Messwerte stehen die messbegleitend erhobenen Informationen zur Verfügung. In Tabelle 11 sind diese Informationen als Gruppierungskriterien mit deren Ausprägungen gezeigt.

Messbegleitende Informationen als Gruppierungskriterien	
Bezug auf das Messobjekt	Bezug auf die Messbedingungen
<ul style="list-style-type: none"> • Deckschichtmaterial Ausprägungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Asphalt ○ Beton • Deckschichtart für Asphaltoberflächen Ausprägungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Splittmastixasphalt (SMA) ○ Asphaltbeton (AB) • Oberflächentextur Ausprägungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Asphalt: offen; geschlossen ○ Beton: offen; mittel, (geschlossen nicht definiert) 	<ul style="list-style-type: none"> • Messgeschwindigkeit Ausprägungen: <ul style="list-style-type: none"> ○ 40 km/h ○ 60 km/h ○ 80 km/h

Tabelle 11: Gruppierungskriterien für Messdaten

Nach diesen Kriterien werden folgende Gruppeneinteilungen vorgenommen:

Fall 1: Gruppierung nach Messgeschwindigkeit	
Für die Gruppierung nach Geschwindigkeit wurden alle Messdaten, für die eine Geschwindigkeitsangabe vorhanden war, in Gruppen eingeteilt.	
Gruppe G1_40:	alle Messfahrten mit Sollmessgeschwindigkeit 40 km/h
Gruppe G1_60:	alle Messfahrten mit Sollmessgeschwindigkeit 60 km/h
Gruppe G1_80:	alle Messfahrten mit Sollmessgeschwindigkeit 80 km/h

Fall 1.1: Gruppierung nach Messgeschwindigkeit für Asphaltoberflächen	
Gruppe G1-1_40:	alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 40 km/h
Gruppe G1-1_60:	alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 60 km/h
Gruppe G1-1_80:	alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 80 km/h

Fall 1.2: Gruppierung nach Messgeschwindigkeit für Betonoberflächen	
Gruppe G1-2_40:	alle Messfahrten auf Betonoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 40 km/h
Gruppe G1-2_60:	alle Messfahrten auf Betonoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 60 km/h
Gruppe G1-2_80:	alle Messfahrten auf Betonoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 80 km/h

Fall 2: Gruppierung nach der Fahrbahnoberfläche	
Gruppe G2_A:	alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen
Gruppe G2_B:	alle Messfahrten auf Betonoberflächen

Fall 3: Gruppierung nach Messgeschwindigkeit und Oberflächentextur für Asphaltoberflächen	
Gruppe G3_40_g:	alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 40 km/h und geschlossener Textur
Gruppe G3_60_g:	Alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 60 km/h und geschlossener Textur
Gruppe G3_80_g:	alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 80 km/h und geschlossener Textur
Gruppe G3_alle_g:	alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen und geschlossener Textur
Gruppe G3_40_o:	alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 40 km/h und offener Textur
Gruppe G3_60_o:	alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 60 km/h und offener Textur
Gruppe G3_80_o:	alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 80 km/h und offener Textur
Gruppe G3_alle_o:	alle Messfahrten auf Asphaltoberflächen und offener Textur

Fall 4: Gruppierung nach Messgeschwindigkeit und Oberflächentextur für Betonoberflächen	
Gruppe G4_80_m:	alle Messfahrten auf Betonoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 80 km/h und mittlerer Textur
Gruppe G4_80_o:	alle Messfahrten auf Betonoberflächen mit Sollmessgeschwindigkeit 80 km/h und offener Textur
Gruppe G4_alle_o:	alle Messfahrten auf Betonoberflächen und offener Textur

Tabelle 12: Gebildete Gruppen für die Untersuchung auf signifikante Unterschiede

Die Gruppierung der Daten bezieht sich somit weitgehend auf das Merkmal Messgeschwindigkeit, das Merkmal Deckschichtart und eine Abschätzung zu der Größe der Oberflächentextur. Während die Zuordnung hinsichtlich Messgeschwindigkeit und Deckschichtart als eindeutig betrachtet werden kann, ist die Einteilung in Gruppen der Oberflächentextur nicht eindeutig und relativ ungenau. Da kein technisches Maß für die Einteilung der Oberflächentextur vorhanden war, erfolgt die Beurteilung/Einteilung unter Berücksichtigung der Deckschichtart. Die Textur wurde in drei Klassen offen, mittel und geschlossen eingeteilt.

1. Für Oberflächen aus Asphalt wurden die Informationen ‚SMA‘ als offene Textur und ‚AB‘ als geschlossene Textur interpretiert. { ΔM }
2. Für Oberflächen aus Beton liegen nur begriffliche Informationen zur Textur vor. Die Oberflächenstruktur Jutetuch wurde als ‚mittel‘ und Texturen mit Jutetuch und dazu weiteren Textureinprägungen (z.B. Kamm oder Besen) als ‚offen‘ gewertet. { ΔM }

Wegen der relativ ungenauen Angaben ist die Einteilung in Texturgruppen auch relativ unsicher zu werten. Beispielsweise kann ein SMA 0/8 durchaus eine relativ geschlossene Textur haben und trotzdem in die Gruppe der offenen Beläge eingeteilt sein. Umgekehrt kann ein AB 0/16 relativ rau und offen sein, obgleich er hier den geschlossenen Belägen zugeordnet wurde.

3.3 Ermittlung von Kalibrierlinien als technischer Zusammenhang zwischen zwei Prüfmerkmalen

Die Kalibrierlinie gibt den Zusammenhang zwischen den wahren Werten der Prüfmerkmale an. Da die wahren Werte ($\xi; \eta$) für die Ermittlung nicht zur Verfügung stehen, werden die Parameter der Kalibrierlinien an den vorhandenen Messwerten bestimmt. Da die Messwerte nicht determiniert, sondern mit einer Prüfstreuung versehen sind, muss diese ‚Unsicherheit der Messwerte‘ bei der Parameterbestimmung berücksichtigt werden. Die dazu notwendigen Modelle werden in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Daten in Klassen aufgeteilt, um spezifische Kalibrierlinien zu ermitteln, die geringere Modellfehler erwarten lassen. Für diese Datenklassen werden die Kalibrierlinien für den linearen und proportionalen Ansatz ermittelt. Um festzustellen, ob die beobachteten Unterschiede zwischen den Parametern der Kalibrierlinien nur zufällig oder signifikant sind, wurden Signifikanzuntersuchungen nachgeschaltet. Konnten keine signifikanten Unterschiede gefunden werden, so ist von der

Gleichheit der Parameter ausgegangen worden. Die Klassen mit gleichen Parametern wurden zu einer Klasse vereinigt und an dieser die Kalibrierparameter erneut bestimmt.

3.3.1 Wahl einer Zusammenhangshypothese zwischen den Prüfmerkmalen X und Y

Mit Verfahren zum statistischen Vergleich von Prüfmerkmalen unterschiedlicher Prüfverfahren hat sich intensiv Herr Dr. Deutler von der Universität Mannheim beschäftigt. Die folgenden Ausführungen basieren im Wesentlichen auf den in DEUTLER 2002 dargelegten statistischen Methoden, die hier konkret auf die Griffigkeitsprüfverfahren angewendet werden.

Soll der Zusammenhang zwischen den gemessenen Werten x und y zweier Prüfmerkmale dargestellt und ermittelt werden, so sucht man nach einem Modell, welches die Beziehung zwischen X und Y beschreibt. Inhalt dieses Modells ist eine mathematische Funktion $y = f(x)$ zur quantitativen Beschreibung des Zusammenhangs. Die Funktion f wird als Kalibrierlinie der beiden Prüfmerkmale bezeichnet. Zunächst sollte man sich darüber bewusst sein, was man bei der Formulierung einer solchen Kalibrierlinie erwarten kann und beachten muss.

Die Kalibrierlinie soll den Zusammenhang zwischen den durch die Prüfverfahren definierten wahren Werten ξ und η beider Prüfmerkmale darstellen. Es gilt somit: $\eta = f(\xi)$. Wünschenswert wäre, dass mit der Funktion f der Zusammenhang zwischen den wahren Werten beider Prüfverfahren exakt und vollständig beschrieben werden kann, so dass alle Punkte (ξ_i, η_i) der Prüfmerkmale auf der Funktionslinie $\eta = f(\xi)$ liegen. Liegen alle Punkte auf der Funktionslinie f , so beschreibt das mathematische Modell den Zusammenhang perfekt. Im vorliegenden Problem ist diese Funktion f zunächst unbekannt und muss noch gefunden werden. Aufgabe ist es daher, aus den vorhandenen Daten Werte abzuleiten, die den wahren Werten nahe liegen, und für diese Werte eine den Zusammenhang beschreibende Funktion f zu finden. Dabei besteht freie Wahl des mathematischen Ansatzes für f .

Man wird aber möglichst bestrebt sein, den Ansatz so einfach wie möglich zu wählen. Je einfacher er ist, desto mehr muss man dann aber ‚in Kauf nehmen‘, dass die Anpassung an den tatsächlichen Zusammenhang schlechter ist. Der Auswertende steht vor einem Optimierungsproblem. Der Ansatz kann, je nach Wahl der Funktion, den Zusammenhang meist nur hinreichend genau beschreiben.

Wurden Kalibrierversuche unter Vergleichbedingungen vorgenommen, dann liegen Messergebnispaare (x_i, y_i) vor. Bekanntlich unterscheiden sich die Messergebnisse x_i und y_i von den wahren Werten (oder hier richtigen Werten) ξ_i und η_i um die Messfehler bzw. prüfbedingten Abweichungen v_i und w_i . Es gelten danach die Prüffehlergleichungen:

$$x_i = \xi_i + v_i \quad \text{mit} \quad \mu_v = E_{v_i} = 0 \text{ und } \sigma_v^2 > 0 \quad 3.3-1$$

$$y_i = \eta_i + w_i \quad \text{mit} \quad \mu_w = E_{w_i} = 0 \text{ und } \sigma_w^2 > 0. \quad 3.3-2$$

Für die Verteilung der Messfehler v_i und w_i wird die Normalverteilung unterstellt mit den Erwartungswerten $\mu_v = 0$ und $\mu_w = 0$, sowie den Varianzen σ_v^2 und σ_w^2 . In Abbildung 19 sind die Prüffehlergleichungen graphisch dargestellt.

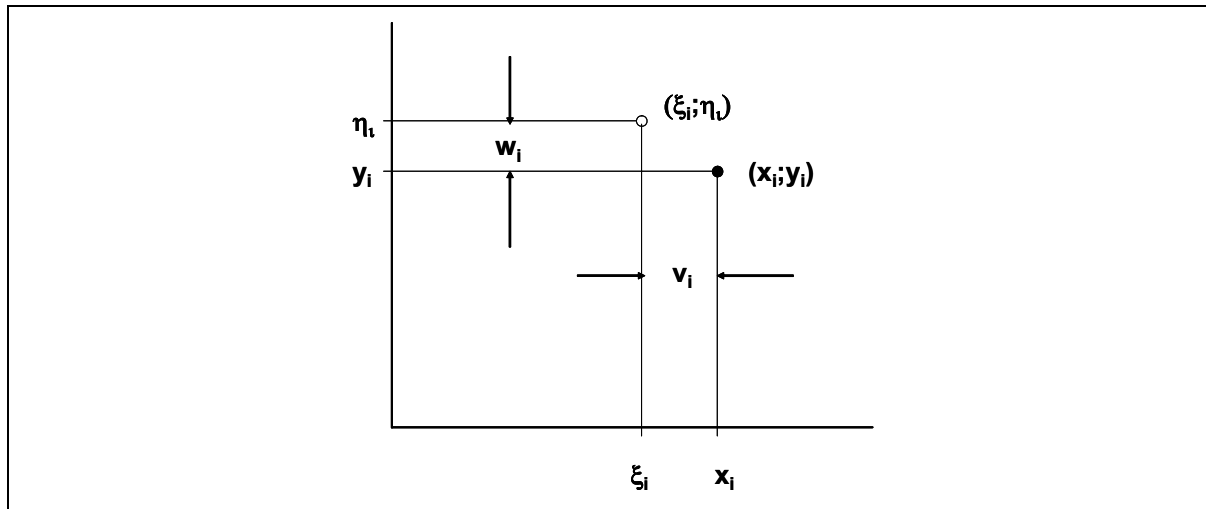


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen den Messwerten x_i , y_i und den wahren Werten ξ_i , η_i , DEUTLER 2002

Das damit verbundene statistische Problem ist, von den empirischen Messwerten auf den Zusammenhang zwischen den wahren Werten der Prüfmerkmale zu schließen und dabei die Prüffehler zu berücksichtigen.

Wurde ein mathematischer Ansatz als Modell für den Zusammenhang gewählt, so ist die Struktur der Funktion f bereits vorgegeben, z.B. beim linearen Ansatz $y = f(x) = a + b x$. Bei einem Regressionsansatz sind die Parameter a und b unter Verwendung der Kleinsten-Quadrate-Methode (KQM) bestimmt worden. Dabei werden die Abstände in vertikaler Richtung $d_i = |y_i - (a + b x_i)|$ der beobachteten Punkte (x_i, y_i) zu den zur Stelle x_i gehörigen Geradenpunkten $y(x_i) = (a + b x_i)$ betrachtet.

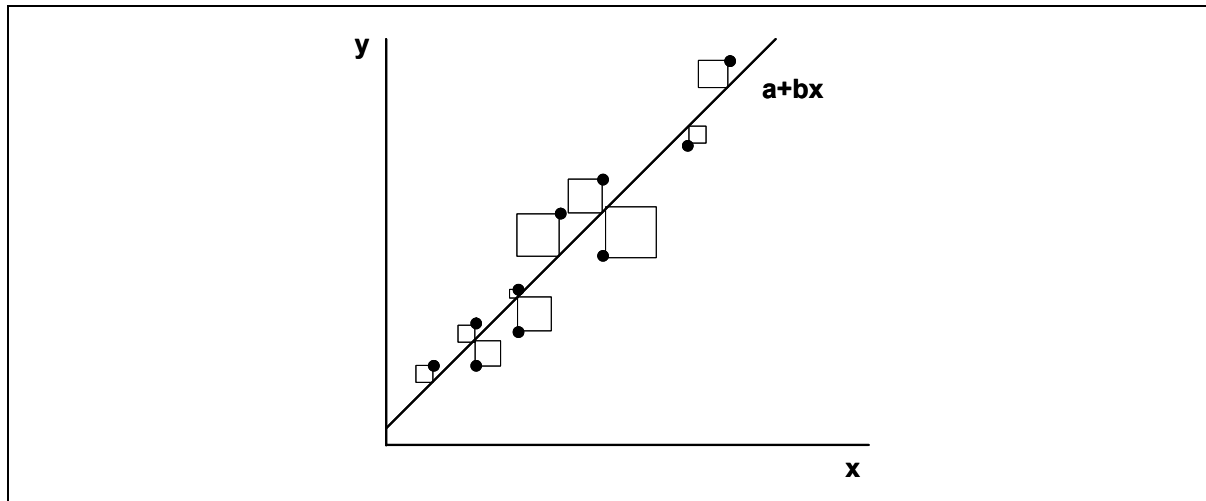


Abbildung 20: Darstellung zur der Kleinsten-Quadrate-Methode (KQM), DEUTLER 2002

Die gesuchten Geradenparameter a und b findet man als Lösung des Minimierungsproblems:

$$\sum d_i^2 = \sum |y_i - (a + bx_i)|^2 \rightarrow \text{Min}(a, b) \quad 3.3-3$$

Diese im Grunde einfache Verfahrensweise ist bekannt und in den meisten Datenverarbeitungsprogrammen implementiert. Obwohl die KQM vielfach benutzt wird, ist sie nicht generell die korrekte bzw. problemadäquate Methode. Veranschaulicht werden soll dieses Problem am Beispiel der ‚Doppelbestimmung‘ eines Prüfmerkmals. DEUTLER 2002 stellt dieses Problem folgendermaßen dar:

Untersucht wird eine Messstelle i des Messobjektes bzw. ein Messobjekt i . Wird diese Messstelle i mit zwei Prüfverfahren untersucht, ergeben sich zwei Messwerte bzw. Messergebnisse x_i und y_i . Diese Messwerte unterscheiden sich von den wahren Merkmalswerten ξ_i und η_i um die prüfbedingten Abweichungen v_i und w_i .

Wird nun mit einem Prüfverfahren die gleiche Messstelle i zweimal gemessen, dann stimmen die wahren Werte ξ_i und η_i an dieser Stelle überein. Die wahren Werte für eine solche Doppelmessung (ξ_i, η_i) liegen auf einer Geraden mit dem Anstieg $\beta = 1$ und $\alpha = 0$. Es wäre folglich zu erwarten, dass bei entsprechend hoher Anzahl gemessener Wertepaare (x_i, y_i) bei solchen Doppelbestimmungen eine Kalibriergerade ermittelt wird, für die $b \approx 1$ und $a \approx 0$ gilt. Wird diese Kalibriergerade mit der KQM bestimmt, ergibt sich im Mittel für die Steigung b der systematisch zu kleine Wert $\beta_{KQ} < 1$.

Anhand der Varianz der prüfbedingten Abweichungen $(\sigma_v)^2$ sowie der Merkmalsvarianz $(\sigma_\xi)^2$ lässt sich β_{KQ} angeben mit:

$$\beta^{KQ} = \frac{1}{1 + \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_\xi} \right)^2} < 1 \quad 3.3-4$$

Dieses Phänomen wird als ‚Regressionseffekt‘ bezeichnet. Dieser Regressionseffekt tritt jedoch nicht nur bei der Doppelbestimmung, sondern auch bei der Bestimmung der Kalibrierlinie zwischen zwei verschiedenen Verfahren auf. Die dort empirisch mit der KQM ermittelte Steigung b_{KQ} ist systematisch zu klein, da sie nur die Streuung in y-Richtung berücksichtigt. Um die Steigung der Kalibriergeraden ohne systematische Abweichung zu ermitteln, kann eine modifizierte KQM oder ein Korrekturterm für das empirisch ermittelte Steigungsmaß b verwendet werden.

Bei der Ermittlung der Parameter der Kalibrierlinie über eine modifizierte KQM werden nicht die Abstände der Messwerte zur Kalibrierlinie in vertikaler Richtung betrachtet, sondern die Abstände in einer Ausgleichsrichtung gebildet, die vom Verhältnis der Prüfvarianzen $(\sigma_v)^2$ und $(\sigma_w)^2$ abhängt. Nur wenn die Prüfvarianzen gleich groß sind, geben die lotrechten Abstände der Punkte (x_i, y_i) zur Kalibrierlinie die problemadäquate Richtung vor. Die korrekte Ausgleichsrichtung lässt sich damit nur unter Kenntnis der Prüfvarianzen $(\sigma_v)^2$ und $(\sigma_w)^2$ bestimmen.

(1) Korrelationsmodell

Wird der Zusammenhang zwischen zwei Prüfmerkmalen X und Y gesucht, steht in der Regel eine fest umrissene Grundgesamtheit an Messobjekten bzw. Messstellen zur Verfügung. Dem Messobjekt i ist ein Wertepaar (ξ_i, η_i) von den wahren Werten ξ_i und η_i bzw. (x_i, y_i) von den gemessenen Werten x_i und y_i zugeordnet. Die wahren Merkmalswerte ξ_i und η_i sind innerhalb der Grundgesamtheit nicht konstant, sondern streuen zufällig. Dementsprechend streuen auch die Messwerte (x_i, y_i) . Der technische Zusammenhang zwischen den wahren Werten ξ_i und η_i wird durch die Messwerte x_i und y_i repräsentiert. Der durch die Punktwolke (x_i, y_i) beschriebene Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen hat jedoch keinen generellen Charakter, sondern bezieht sich nur auf die konkret untersuchte Grundgesamtheit. Statistisch gesehen sind deshalb die beiden Größen ξ und η im Korrelationsmodell auch als Zufallsgrößen zu betrachten.

Über die KQM lassen sich jeweils Geradengleichungen zum Zusammenhang der Prüfverfahren ermitteln. Die empirische Geradengleichung $\eta = f(\xi) = \alpha + \beta\xi$ beschreibt, welcher Wert η in der Grundgesamtheit im Mittel zum Wert ξ gehört. Entsprechend

beschreibt die Geradengleichung $\xi = g(\eta) = \gamma + \delta\eta$, welcher Wert ξ in der Grundgesamtheit im Mittel zum Wert η gehört. Die beiden Regressionsgleichungen beschreiben, abhängig von der Ableserichtung, den Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen. Zu jeder Grundgesamtheit existiert immer ein solches Paar an Regressionsgeraden. Diese Geraden werden auch als Mittelwertlinien bezeichnet, dürfen jedoch nicht mit der gesuchten Kalibrierlinie zwischen den beiden Prüfmerkmalen verwechselt werden.

Die Verwendung von zwei Mittelwertlinien zur gegenseitigen Transformation der Prüfmerkmale hat zwei Nachteile: Zum einen geben die Mittelwertlinien den Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen nur für die untersuchte Grundgesamtheit wieder und zum anderen beschreibt diese Funktion den technischen Zusammenhang nur in einer Ableserichtung, siehe Abbildung 23.

Die Voraussetzungen für das Korrelationsmodell sind folgende:

1. Die Prüfverfahren haben keine systematischen Abweichungen. Die gemessenen Werte streuen im Mittel um den wahren Wert.

Die Erwartungswerte der Messwerte entsprechen den wahren Werten:

$$\begin{aligned}\mu_x &= Ex_i = \xi_i \\ \mu_y &= Ey_i = \eta_i\end{aligned}\tag{3.3-5}$$

Die Erwartungswerte für die messbedingten Abweichungen v und w sind dann:

$$\begin{aligned}\mu_v &= Ev_i = 0 \\ \mu_w &= Ew_i = 0\end{aligned}\tag{3.3-6}$$

2. Die Präzision des Prüfverfahrens sei im technisch relevanten Einsatzbereich konstant, das heißt es liegt Varianzhomogenität vor.
3. Die einzelnen Messungen werden jeweils unabhängig voneinander durchgeführt und beeinflussen sich gegenseitig nicht, so dass sich auch die prüfbedingten Abweichungen gegenseitig nicht beeinflussen. Ebenso sind die prüfbedingten Abweichungen untereinander unabhängig:
 - Unabhängigkeit der prüfbedingten Abweichungen v_i untereinander.
 - Unabhängigkeit der prüfbedingten Abweichungen w_i untereinander.

- Gegenseitige Unabhängigkeit der prüfbedingten Abweichungen jedes v_i und jedes w_j voneinander mit $(1 \leq i \leq n; 1 \leq j \leq n)$.

Sind die prüfbedingten Abweichungen v_i und w_i normalverteilt, so ist die geforderte Unabhängigkeit gleichbedeutend mit nicht vorhandenen Korrelationen. Für eine Normalverteilung von unabhängigen v_i - und w_i -Werten sind die Linien gleicher Wahrscheinlichkeitsdichte Ellipsen mit Zentrum im Nullpunkt. Verschwindet die Korrelation zwischen den prüfbedingten Abweichungen, dann sind die Hauptachsen dieser Ellipse parallel zu den Achsen des Koordinatensystems. Ansonsten ist die Ellipse geneigt, wobei die Größe der Neigung vom Korrelationskoeffizienten (bei Mehrfachbestimmung an der Messstelle i) abhängt, siehe Abbildung 21. In diesem Beispiel besteht also keine Unabhängigkeit.

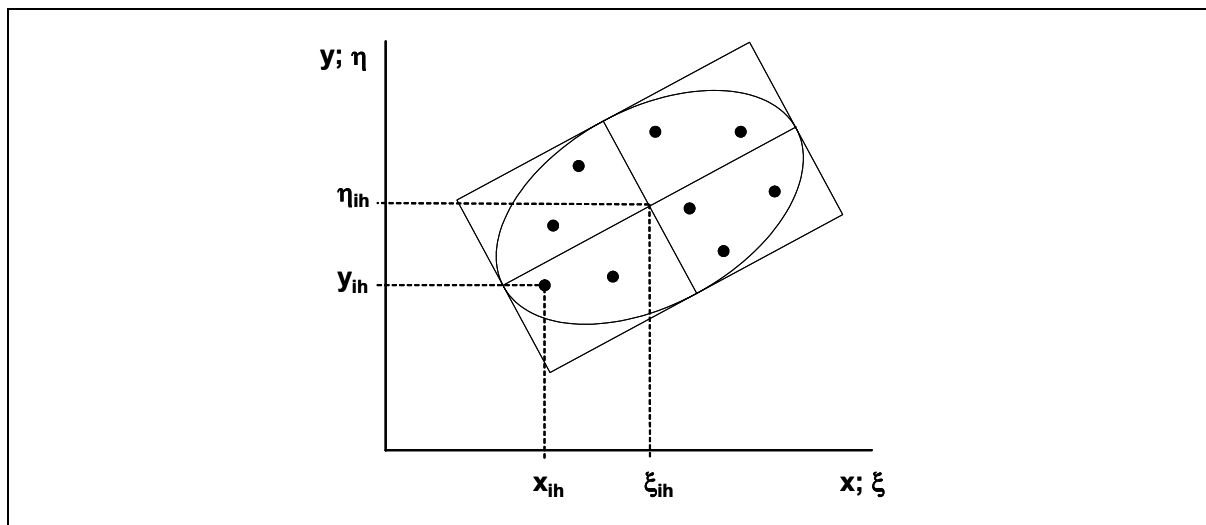


Abbildung 21: Korrelationsellipse der prüfbedingten Abweichungen nach DEUTLER 2002

Die Varianz der prüfbedingten Abweichungen wird durch Ringversuche ermittelt. Die Voraussetzungen für die Durchführung und Auswertung von Ringversuchen sind im FGSV-Merkblatt über die ‚Statistische Auswertung von Ringversuchen‘ Teil 4 und in DIN ISO 5725 enthalten. Für die im Korrelationsmodell erfassten prüfbedingten Abweichungen werden Vergleichbedingungen vorausgesetzt.

(2) ‚Fehler-in-den-Variablen Modell‘ (FV – Modell)

Im mathematischen Sinne werden an die Kalibrierfunktion verschiedene Forderungen gestellt. Soll diese Kalibrierfunktion die Möglichkeit der Messwertübertragung von dem einen Prüfverfahren auf das andere Prüfverfahren geben und umgekehrt, so muss diese Funktion umkehrbar eindeutig sein. Verläuft im praxisrelevanten Messbereich diese Funktion streng monoton, dann ist auch die Umkehrfunktion $f^{-1}(\eta) = g(\eta) = \xi$ streng monoton.

Da der gewählte Ansatz eine möglichst einfache mathematische Struktur besitzen sollte, werden im Allgemeinen möglichst einfache Ansätze gewählt, zum Beispiel:

$$\eta = \alpha + \beta \xi \quad (\text{linearer Ansatz}), \quad 3.3-7$$

$$\eta = \delta \xi \quad (\text{proportionaler Ansatz}), \quad 3.3-8$$

$$\eta = \alpha + \beta \xi + \gamma \xi^2 \quad (\text{quadratischer Ansatz}). \quad 3.3-9$$

Es ist jedoch nicht davon auszugehen, dass mit dem gewählten Ansatz der tatsächliche technische Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen exakt beschrieben wird. Nicht jeder wahre Wert (ξ_i, η_i) wird genau auf der Kalibrierlinie des ausgewählten Ansatzes liegen. Die Abweichungen zwischen der Kalibrierlinie und den wahren Werten werden im Modell durch den Modellfehler ε_i berücksichtigt. In Abbildung 22 ist der Zusammenhang zwischen den wahren Werten und dem Modellfehler infolge des gewählten funktionalen Ansatzes verdeutlicht.

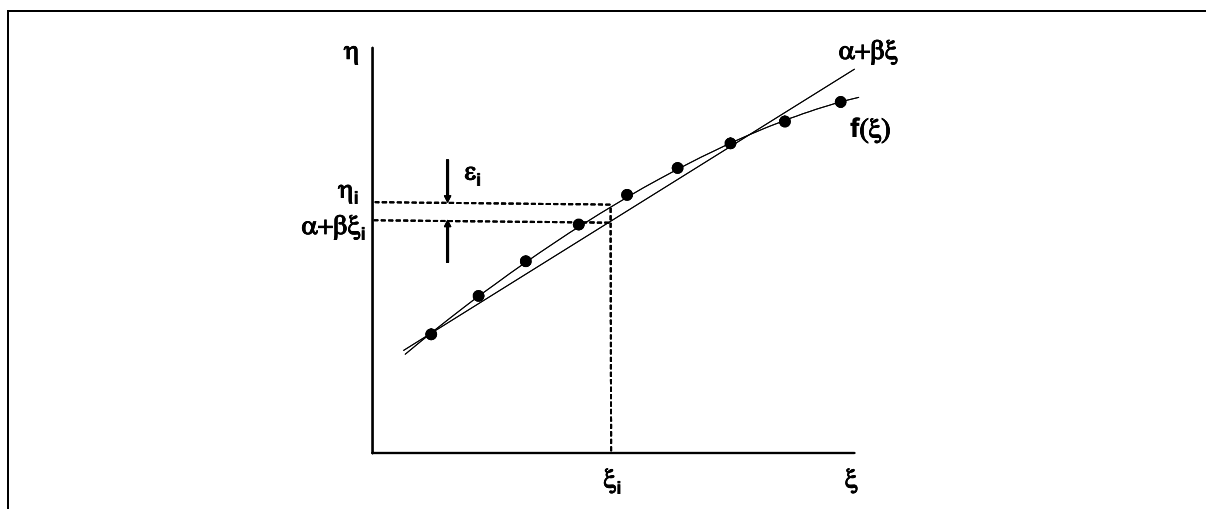


Abbildung 22: Modellfehler ε bei Diskrepanz zwischen der gewählten Kalibrierlinie und dem tatsächlichen technischen Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen ξ und η nach DEUTLER 2002

Der Zusammenhang zwischen dem Modellfehler und den wahren Werten wird formal beschrieben durch:

$$\eta_i = f(\xi_i) + \varepsilon_i. \quad 3.3-10$$

$$\eta_i = \alpha + \beta \xi_i + \varepsilon_i. \quad 3.3-11$$

Gemäß dieser Modellgleichung wirkt der Modellfehler ε_i wie die prüfbedingte Abweichung w_i in vertikaler Ableserichtung. Der Modellfehler und die prüfbedingte Abweichung lassen sich deshalb zu einem Gesamtfehler $\omega_i = w_i + \varepsilon_i$ zusammenfassen.

An den Modellfehler werden wiederum **Modellannahmen** geknüpft:

1. Die Erwartungswerte des Modellfehlers ε_i sollen den Wert Null haben. Das bedeutet, dass sich die Modellfehler im Mittel aufheben:

$$\mu_{\varepsilon} = E\varepsilon_i = 0. \quad 3.3-12$$

2. Es besteht Varianzhomogenität, das heißt die Streuung der Modellfehler ist an jeder Messstelle i im Mittel gleich groß.

3. Die Modellfehler sind unabhängig von den Messwiederholungen. $\{\Delta \mathbf{M}\}$

Die Annahme 1 trifft jedoch nur dann zu, wenn der gewählte funktionale Ansatz den tatsächlichen Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen korrekt beschreibt. Würde eine Funktion gewählt, die den Zusammenhang nicht korrekt beschreibt, so treten zwangsläufig Modellfehler auf und der Erwartungswert des Modellfehlers ist nicht Null. Sind Abweichungen ε_i vorhanden, treten zwangsläufig auch Modellfehler in umgekehrter Ableserichtung auf:

$$\xi_i = g(\eta_i) + \zeta_i \quad 3.3-13$$

Dieser Modellfehler ζ_i wirkt in gleicher Richtung wie die prüfbedingte Abweichung v_i und kann deshalb mit v_i zu einem gemeinsamen Fehler $\zeta_i + v_i$ zusammengefasst werden.

3.3.2 Fehler-in-den-Variablen Modell für lineare Ansätze

(1) 2-parametriger linearer Ansatz

Wird für die Kalibrierlinie $\eta = f(\xi)$ eine lineare Form $\eta = \alpha + \beta \xi$ gewählt, dann ergeben sich folgende Modell- und Prüffehlergleichungen zusammen mit den statistischen Voraussetzungen an die Fehlerkomponenten v_i , w_i und ε_i :

Modellgleichung

$$\eta_i = \alpha + \beta \xi_i + \varepsilon_i \quad \text{mit} \quad \mu_\varepsilon = E \varepsilon_i = 0 \text{ und } \sigma_\varepsilon^2 > 0 \quad 3.3-14$$

Prüffehlergleichungen

$$x_i = \xi_i + v_i \quad \text{mit} \quad \mu_v = E v_i = 0 \text{ und } \sigma_v^2 > 0 \quad 3.3-15$$

$$y_i = \eta_i + w_i \quad \text{mit} \quad \mu_w = E w_i = 0 \text{ und } \sigma_w^2 > 0 \quad 3.3-16$$

Für die Fehlerkomponenten untereinander wird vorausgesetzt, dass sie sich gegenseitig nicht beeinflussen, so dass für die Korrelationskoeffizienten $\rho_{vw} = 0$, $\rho_{v\varepsilon} = 0$ und $\rho_{w\varepsilon} = 0$ gilt.

Dieses Modell enthält insgesamt sieben Modellparameter:

- Mittelwert der ξ_i -Werte
$$\mu_\xi = \frac{\sum \xi_i}{n},$$
- Varianz der ξ_i -Werte
$$\sigma_\xi^2 = \frac{\sum (\xi_i - \mu_\xi)^2}{n},$$
- Ordinatenabschnitt der Kalibriergeraden
$$\alpha,$$
- Steigung der Kalibriergeraden
$$\beta,$$

- Varianz der prüfbedingten Abweichungen v σ_v^2 ,
- Varianz der prüfbedingten Abweichungen w σ_w^2 ,
- Varianz des Modellfehlers ε σ_ε^2 .

Die Modellparameter sind durch die in einem Ringversuch bzw. Kalibrierversuch ermittelten Messwertpaare (x_i, y_i) zu bestimmen. Unter den gegebenen Modellvoraussetzungen lassen sich jedoch nur folgende fünf Parameter aus Messwertpaaren (x_i, y_i) ermitteln. Das sind für die Prüfmerkmale X und Y die Stichprobengrößen:

- Stichprobenmittelwert für X $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n}$,
- Stichprobenmittelwert für Y $\bar{y} = \frac{\sum y_i}{n}$,
- Stichprobenvarianz für X $s_x^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}$,
- Stichprobenvarianz für Y $s_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{(n-1)}$,
- Stichprobenkovarianz für X und Y $s_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)}$.

Diese empirischen Werte streuen um ihre Erwartungswerte. Sie sind die besten Schätzer für die wahren Werte und liegen in der Nähe ihrer Erwartungswerte. Für die empirischen Werte lassen sich deshalb folgende Beziehungen zu den wahren Werten aufbauen:

- $\mu_x = E\bar{x} = \mu_\xi$,
- $\mu_y = E\bar{y} = \mu_\eta$,
- $\sigma_x^2 = Es_x^2 = \sigma_\xi^2 + \sigma_v^2$,
- $\sigma_y^2 = Es_y^2 = \beta^2 \sigma_\xi^2 + \sigma_w^2 + \sigma_\varepsilon^2$,
- $\sigma_{xy} = Es_{xy} = \beta \sigma_\xi^2$.

Die wahren Werte können aus den empirischen Werten nur näherungsweise bestimmt, das heißt statistisch geschätzt, werden. Demzufolge erhält man für die sieben unbekannten Parameter folgende Bestimmungsgleichungen:

- $\bar{x} = \mu_\xi$,
- $\bar{y} = \alpha + \beta \mu_\xi$,

- $s_x^2 = \sigma_\xi^2 + \sigma_v^2$,
- $s_y^2 = \beta^2 \sigma_\xi^2 + \sigma_w^2 + \sigma_\varepsilon^2$,
- $s_{xy} = \beta \sigma_\xi^2$.

Jedoch lassen sich aus diesen fünf Gleichungen die sieben gesuchten Modellparameter nicht eindeutig bestimmen. Durch die Umgestaltung des Modells wird eine Reparametrisierung erreicht, so dass eine eindeutige Lösung möglich ist. Dazu werden die vorhandenen Modellparameter durch andere Parameter ersetzt und eine Neuformulierung des Modells vorgenommen:

Man setzt

$$\lambda_i = \alpha + \beta \xi_i$$

sowie $\omega_i = w_i + \varepsilon_i$ wobei $\mu_\omega = E\omega_i = 0$ und $\sigma_\omega^2 = \sigma_w^2 + \sigma_\varepsilon^2$ gilt

und erhält damit folgende Modell- und Prüffehlergleichungen:

Modellgleichung

$$\lambda_i = \alpha + \beta \xi_i$$

Prüffehlergleichungen

$$x_i = \xi_i + v_i$$

$$y_i = \lambda_i + \omega_i$$

Dieses reduzierte Modell hat dann nur noch folgende sechs Parameter:

- $\bar{x} = \mu_\xi$,
- $\bar{y} = \alpha + \beta \mu_\xi$,
- $s_x^2 = \sigma_\xi^2 + \sigma_v^2$,
- $s_y^2 = \beta^2 \sigma_\xi^2 + \sigma_\omega^2$,
- $s_{xy} = \beta \sigma_\xi^2$.

Das reduzierte Modell unterscheidet sich vom ausführlichen Modell durch die additive Zusammenführung der prüfbedingten Abweichung w_i mit dem Modellfehler ε_i . Somit werden hier die Zahlenpaare (ξ_i, η_i) nicht mehr als die wahren Werte interpretiert, sondern die Zahlenpaare $(\xi_i, \lambda_i = \alpha + \beta \xi_i)$. Durch den Übergang zum reduzierten Modell ändern sich die Parameter α und β der gesuchten Kalibriergeraden nicht.

Da beim reduzierten Modell nur fünf Gleichungen mit sechs Unbekannten vorliegen, werden zusätzliche Informationen für die Lösung dieses Problems erforderlich. Die zusätzlich

notwendigen Informationen stellen in der Regel die ermittelten Standardabweichungen der prüfbedingten Abweichungen σ_v^2 und/ oder σ_w^2 dar.

Bestimmung der Kalibrierlinie bei Kenntnis der Prüffehlervarianzen

Die Varianzen der prüfbedingten Abweichungen σ_v^2 und σ_w^2 werden in Ringversuchen bestimmt. Für die Ermittlung einer Kalibrierlinie werden die prüfbedingten Abweichungen unter Vergleichbedingungen verwendet. Zur Berechnung der Schätzwerte für die Modellparameter α und β wird der Parameter $\Theta = \sigma_w^2/\sigma_v^2$ eingeführt. Damit berechnen sich unter Ansatz einer linearen Kalibrierfunktion der Geradenanstieg und der Achsenabschnitt nach:

$$b_\theta = \frac{(s_y^2 - \theta s_x^2) + \sqrt{4\theta s_{xy}^2 + (s_y^2 - \theta s_x^2)^2}}{2s_{xy}}$$

$$a_\theta = \bar{y} - b_\theta \bar{x}.$$

Die Werte a_θ und b_θ sind jedoch nur dann gute Schätzungen für α und β , wenn der Modellfehler ε nicht vorhanden ist. Für eine technisch definierte Prüfgröße, wie beispielsweise die Griffigkeit, lässt sich meist der Modellfehler nicht ausschließen. Dann weist die Schätzung für α und β eine systematische Abweichung auf, die umso größer ist, je größer dieser Modellfehler ist.

(2) 1-parametriger linearer Ansatz (proportional)

Neben der Verwendung eines linearen Ansatzes für die Kalibrierlinie zwischen zwei Prüfverfahren ist auch die Verwendung anderer funktionaler Zusammenhänge denkbar. Der proportionale Ansatz hat gegenüber dem linearen Ansatz den Vorteil, die Übereinstimmung der Prüfwerte für den theoretischen Fall nicht vorhandener Reibungswiderstände zu ermöglichen. Ist der tatsächliche Wert der Reibung Null und der Messwert des einen Verfahrens Null, dann sollte der Messwert des anderen Verfahrens auch unabhängig von der Kalibrierfunktion Null sein.

Die Kalibrierlinie geht dann durch den Koordinatenursprung ($\xi = 0, \eta = 0$). Modellgleichung und Prüffehlergleichung reduzieren sich dadurch um einen Parameter:

Modellgleichung

$$\eta_i = \delta \xi_i + \varepsilon_i \quad \text{mit} \quad \mu_\varepsilon = E \varepsilon_i = 0 \quad \text{und} \quad \sigma_\varepsilon^2 > 0 \quad 3.3-17$$

Prüffehlergleichungen

$$x_i = \xi_i + v_i \quad \text{mit} \quad \mu_v = E v_i = 0 \quad \text{und} \quad \sigma_v^2 > 0 \quad 3.3-18$$

$$y_i = \eta_i + w_i \quad \text{mit} \quad \mu_w = E w_i = 0 \quad \text{und} \quad \sigma_w^2 > 0 \quad \text{3.3-19}$$

Es treten folgende sechs Parameter auf:

- Mittelwert der ξ_i -Werte $\mu_\xi = \frac{\sum \xi_i}{n},$
- Varianz der ξ_i -Werte $\sigma_\xi^2 = \frac{\sum (\xi_i - \mu_\xi)^2}{n},$
- Steigung der Kalibriergeraden $\delta,$
- Varianz der prüfbedingten Abweichungen v $\sigma_v^2,$
- Varianz der prüfbedingten Abweichungen w $\sigma_w^2,$
- Varianz des Modellfehlers ε $\sigma_\varepsilon^2.$

Analog zum linearen Ansatz sind für diese sechs Parameter jedoch nur fünf Gleichungen vorhanden. Die Gleichungen lauten:

- Stichprobenmittelwert X $\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n},$
- Stichprobenmittelwert Y $\bar{y} = \delta \mu_\xi,$
- Stichprobenvarianz für X $s_x^2 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)},$
- Stichprobenvarianz für Y $s_y^2 = \frac{\sum (y_i - \bar{y})^2}{(n-1)} = \delta^2 \sigma_\xi^2 + \sigma_w^2 + \sigma_\varepsilon^2,$
- Stichprobenkovarianz für X und Y $s_{xy} = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{(n-1)} = \delta s_\xi^2.$

Durch die Zusammenfassung der prüfbedingten Abweichung w_i und des Modellfehlers ε_i zu einem Gesamtfehler ω_i , lässt sich die Anzahl der Unbekannten wiederum um Eins reduzieren. Für die Stichprobenvarianz des Merkmals Y gilt dann:

$$s_y^2 = \delta^2 \sigma_\xi^2 + \sigma_\omega^2.$$

Folglich reduzieren sich die Bestimmungsgleichungen auf:

- Stichprobenmittelwert für X $\bar{x} = \mu_\xi,$
- Stichprobenmittelwert für Y $\bar{y} = \delta \mu_\xi,$
- Stichprobenvarianz für X $s_x^2 = \sigma_\xi^2 + \sigma_v^2,$

- Stichprobenvarianz für Y $s_y^2 = \delta \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\omega^2$,
- Stichprobenkovarianz für X und Y $s_{xy} = \delta s_\varepsilon^2$.

Damit sind die gesuchten Parameter eindeutig bestimmbar. Aus den gemessenen Werten (x_i, y_i) können die Parameter jedoch nicht exakt ermittelt, sondern nur statistisch geschätzt werden. Nach dem Auflösen des Gleichungssystems erhält man folgende Formeln zur Schätzung der gesuchten Parameter:

- Anstieg der Kalibriergeraden δ $d = \frac{\bar{y}}{\bar{x}}$,
- Streuung des Anstieges σ_d^2 $s_d^2 = \frac{(s_\omega^2 + d^2 s_v^2)}{n\bar{x}}$,
- Prüfbedingte Streuung des Merkmals X
(falls σ_v^2 bekannt aus Ringversuchen ist) $s_v^2 = s_x^2 - \frac{s_{xy}}{d}$,
- Streuung des Gesamtfehlers σ_ω^2 $s_\omega^2 = s_y^2 - d s_{xy}$,
- Streuung des Modellfehlers σ_ε^2 $s_\varepsilon^2 = s_\omega^2 - \sigma_w^2$.

3.3.3 FV - Modell für einen nicht linearen Ansatz

Auch wenn der nichtlineare Ansatz innerhalb dieser Arbeit nicht Gegenstand der Betrachtung ist, wird er hier zur Vollständigkeit vorgestellt. Gute Annäherungen lassen sich mit einem p – dimensional Polynom erreichen. Die dazugehörigen Modellgleichungen und Prüffehlergleichungen lauten danach:

Modellgleichung

$$\eta_i = \beta_0 + \beta_1 \xi_i + \beta_2 (\xi_i)^2 + \dots + \beta_p (\xi_i)^p \quad 3.3-20$$

Prüffehlergleichungen

$$\begin{aligned} x_i &= \xi_i + v_i \\ y_i &= \eta_i + w_i \end{aligned} \quad 3.3-21$$

Damit sind insgesamt p + 1 Parameter zur Beschreibung der Kalibrierlinie notwendig, zu deren Parameterbestimmung ein lineares Gleichungssystem zu lösen ist.

3.3.4 Methodik zur Prüfung der Verwendbarkeit ermittelter Zusammenhänge

Mit der Wahl eines mathematischen Ansatzes für die Kalibrierlinie wurde eine Hypothese über den Zusammenhang zwischen beiden Prüfmerkmalen formuliert. Werden

unterschiedliche Ansätze formuliert, stellt sich letztendlich die Frage: Welcher Ansatz zeigt eine bessere Anpassung an die vorhandenen Datenpunkte?

Neben der guten Anpassung an die Datenpunkte als mathematisches Kriterium ist aber vor allem nachzuprüfen, ob der gewählte Ansatz technisch plausibel ist und dem Zusammenhang zwischen den Prüfgrößen entsprechen kann.

Betrachtet man zunächst nur die mathematischen Kriterien, dann soll die Kalibrierlinie so liegen, dass die Residuen ε_i (also die Abweichungen zwischen den Messpunkten und der Kalibrierlinie) und ihre Varianzen möglichst klein sind.

(1) Vergleich der ermittelten Modellzusammenhänge

Zur Überprüfung der Anpassung der gewählten Zusammenhangsfunktion an die empirischen Daten wurden die vertikalen Abweichungen zwischen den Messergebnissen (x_i, y_i) und den erwarteten Ergebnissen gebildet. Unter den erwarteten Ergebnissen werden diejenigen Punkte verstanden, die exakt der gewählten Zusammenhangsfunktion folgen. Nach der Modellgleichung sind das die Werte

$$\eta_i = \beta \xi_i + \alpha, \quad 3.3-22$$

so dass sich die erwarteten Ergebnisse als (ξ_i, η_i) darstellen lassen. Da jedoch die Werte ξ_i nicht bekannt sind, werden in der Modellgleichung dafür ersatzweise die Werte x_i verwendet. Die abgeänderte Modellgleichung lautet danach:

$$\eta_i = \beta x_i + \alpha. \quad 3.3-23$$

Die Streuung des Prüfmerkmals X wird bei der Überprüfung der gewählten Zusammenhangsfunktion vernachlässigt. Diese Voraussetzung wurde bereits bei der Bestimmung der Regressionsparameter angenommen. Die Ermittlung der Residuen zwischen der Regressionsgeraden und den Messpunkten entspricht der Bestimmung der Abweichung zwischen dem angenommenen Modellzusammenhang, den Modellabweichungen ε und den prüfbedingten Streuungen w in Richtung des Prüfmerkmals Y .

Die Modellgleichung und die Fehlergleichungen für die Kalibrierlinie hingegen berücksichtigen die Streuung sowohl für das Prüfmerkmal X , als auch für das Prüfmerkmal Y . Wie bereits bekannt, lauten die Modellgleichungen im FV - Modell für eine Kalibriergerade:

$$\eta_i = \beta \xi_i + \alpha, \quad 3.3-24$$

$$x_i = \xi_i + v_i, \quad 3.3-25$$

$$y_i = \eta_i + w_i + \varepsilon_i.$$

3.3-26

Die Güte der Anpassung der Funktion f an die empirische Datenmenge wird durch den Wert des Bestimmtheitsmaßes beschrieben.

Zur weiteren Überprüfung der gefundenen Modellzusammenhänge werden die Residuen zwischen den Messwerten und den theoretischen Werten untersucht. In den Residuen sind der Modellfehler ε und die prüfbedingten Abweichungen enthalten. Der Modellfehler ε kann jedoch nicht getrennt von den prüfbedingten Abweichungen w_i beobachtet und auf seine Normalverteilung hin untersucht werden. Deshalb muss folgende gedankliche Brücke gewählt werden: Die prüfbedingten Abweichungen w_i sind laut Annahme normal verteilt. Für die zusammengesetzte Größe $\omega = (\varepsilon + w)$ ist eine Normalverteilung zu beobachten, wenn auch ε normal verteilt ist (Normalverteilungsgesetz) und zusätzlich die Größen ε und w unabhängige Zufallsvariablen sind.

$$N(w; \sigma_w) \quad \text{und} \quad N(w + \varepsilon; \sigma_{w+\varepsilon}) \longrightarrow N(\varepsilon; \sigma_\varepsilon) \quad 3.3-27$$

Kann den Residuen eine Normalverteilung mit $E \varepsilon = 0$ nachgewiesen werden, so wird davon ausgegangen, dass sie zufälligen Charakter haben und keine systematischen Anteile enthalten $\{\Delta M\}$.

(1.1) Test der Residuen auf Normalverteilung

Da die Residuen im Mittelpunkt der weiteren Betrachtungen liegen, wird zunächst überprüft, ob die Hypothese auf Annahme einer Normalverteilung der Residuen widerlegt werden kann. Für den Test auf Normalverteilung wird von der Nullhypothese H_0 ausgegangen, dass die zu untersuchenden Daten normal verteilt sind $\{\Delta M\}$.

Für den Test auf Normalverteilung stehen verschiedene statistische Testverfahren zur Verfügung. Ein Testverfahren ist der KOLMOGOROV-SMIRNOV-Test. Bei diesem Test wird unter anderem die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der ein Fehler begangen wird, wenn die Normalverteilungshypothese fälschlicherweise abgelehnt wird. In Anlage 7 ist diese Irrtumswahrscheinlichkeit unter der Spalte Signifikanz angegeben. Danach ist die Wahrscheinlichkeit, fälschlicherweise die Nullhypothese abzulehnen, nahezu Null, und zwar deswegen nur ‚nahezu‘, weil die Signifikanz lediglich auf die dritte Nachkommastelle angegeben worden ist. Mit anderen Worten war hiernach die Normalverteilungshypothese aufzugeben. Gleichzeitig ist jedoch zu beachten, dass der KOLMOGOROV-SMIRNOV-Test ein sehr strenger Test ist, die Hypothese wird dabei auf nahezu perfekte Übereinstimmung mit der Normalverteilung getestet. Liegen sehr viele Messwerte vor, dann wird die Hypothese auch

dann abgelehnt, wenn diese nur nahezu normal verteilt sind. Bei einer großen Datenmenge führen somit auch kleinere Abweichungen zum Verwerfen der Hypothese.

Für den praktischen Anwendungsfall kann es jedoch sinnvoll sein, die Normalverteilungshypothese auf Grundlage des KOLMOGOROV-SMIRNOV-Testes nicht zu verwerfen und sich den Graphen der Verteilungsfunktion näher zu betrachten. Die Graphen der bestimmten Residuen stimmen näherungsweise mit einer normal verteilten Größe gut überein, so dass die Hypothese auf Normalverteilung nicht abgelehnt werden konnte. Die Ergebnisse sind in Anlage 7 dargestellt. Auf Grundlage dieser Untersuchungen lässt sich kein hier vorgestellter Ansatz bevorzugen.

(1.2) Test auf signifikante Abweichungen zwischen den Regressionsgeraden unterschiedlicher Grundgesamtheiten

In den vorangegangenen Abschnitten wurde gezeigt, dass die Parameter der Regressionsgeraden erste Schätzungen für die Parameter der Kalibriergeraden sind. Je nach ‚Blickrichtung‘ $X \rightarrow Y$ bzw. $Y \rightarrow X$ werden aber mit der KQM nur die Differenzen in vertikaler bzw. horizontaler Richtung zwischen den Messpunkten und der Geraden berücksichtigt. Ferner wurde gezeigt, dass dies zu einer systematischen Unterschätzung der Parameter führt und dass die Berücksichtigung des Punktabstandes zur Geraden unter dem Verhältnis σ_v^2 und σ_w^2 zu genaueren Ergebnissen führen würde.

Bei Ermittlung der Regressionsgeraden $X \rightarrow Y$ bzw. $Y \rightarrow X$ werden die ‚extremen‘ Lagen der Kalibriergeraden bestimmt. Die tatsächliche (gesuchte) Kalibriergerade $\eta = \alpha + \beta\xi$ liegt jedoch zwischen beiden Regressionsgeraden. Abbildung 23 verdeutlicht die Lage der Geraden zueinander.

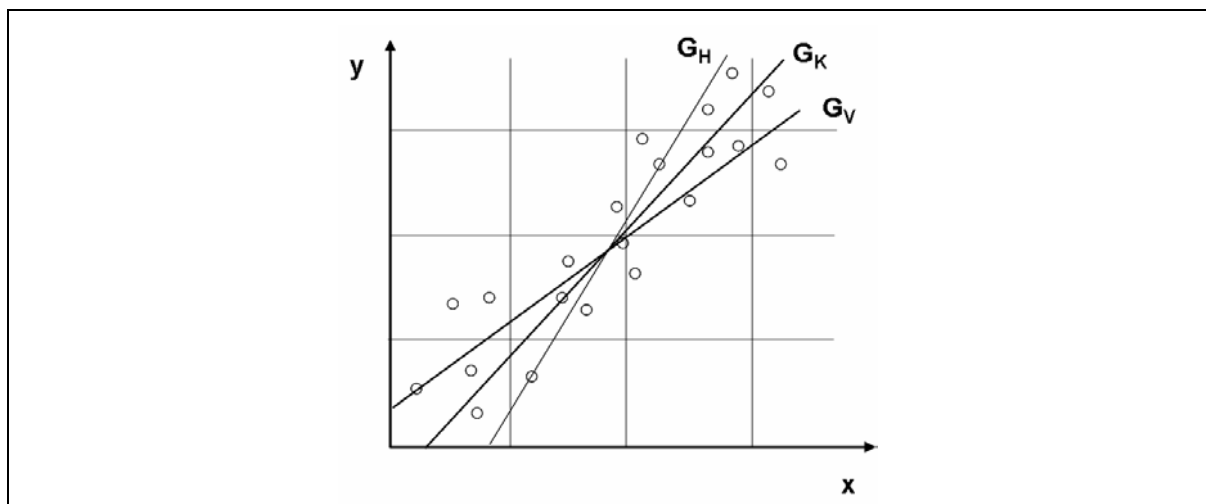


Abbildung 23: Lage der Regressionsgeraden und der zugehörigen Kalibriergeraden, DEUTLER 2002

Die Gerade G_H beschreibt die Lage der Regressionsgerade unter der Bedingung, dass die Werte auf der Y-Achse determiniert sind. Entsprechend werden nur Abweichungen in horizontaler Richtung bei der Regression berücksichtigt. Bei der Geraden G_V wurden im Gegensatz dazu die Werte auf der X-Achse als determiniert betrachtet. Die Gerade G_K (Kalibrierlinie) berücksichtigt, dass die Größen auf der X- und der Y-Achse in der Realität jeweils nicht determiniert sind.

In der anschließenden Auswertung werden aus der vorliegenden Menge verwendbarer Messdaten unterschiedliche Grundgesamtheiten bzw. Datenklassen definiert und an diesen der Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen ermittelt. Jeder definierten Grundgesamtheit wird demnach ein spezifischer Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen durch eine spezifische Regression bzw. einen Kalibrieransatz zugewiesen. Da die Definition von Grundgesamtheiten, also die Klassifizierung der Daten nach bestimmten Kriterien, mehr oder weniger beliebig bzw. auf spezifische Fragestellungen zugeschnitten ist, können auch beliebig viele Grundgesamtheiten und damit Zusammenhänge definiert werden.

(2) Signifikanzuntersuchungen

Für eine **technisch–praktische** Definition des Zusammenhangs wird man jedoch immer bestrebt sein, so wenig wie möglich unterschiedliche, spezifische Funktionen anzugeben. Wenn möglich, ist genau eine Lösung für die Zusammenhangsfunktion gesucht. Es stellt sich die Frage, ob sich die für die einzelnen Grundgesamtheiten ermittelten Funktionen unterscheiden oder nicht.

- (1) Können signifikante Unterschiede zwischen den Funktionen ermittelt werden, dann liegen mit hoher Wahrscheinlichkeit tatsächliche Unterschiede in der Beschreibung des Zusammenhangs vor.
 - (2) Können keine signifikanten Unterschiede ermittelt werden, dann bedeutet das zwar nicht die Gleichheit der Zusammenhänge, die Gleichheit kann aber unter den gegebenen Umständen nicht ausgeschlossen werden. Die Hypothese auf Gleichheit kann dann bestehen bleiben.
- {ΔM}**

Trotz einer tatsächlichen Gleichheit des Zusammenhangs zweier Grundgesamtheiten müssen die betrachteten Zahlenwerte für die Parameter der Kalibriergeraden (oder hier auch Regressionsgeraden) nicht exakt übereinstimmen. Die Begründung dafür liegt in der begrenzten Genauigkeit von aus Stichproben gewonnenen Informationen. Diese Stichproben repräsentieren mehr oder weniger gut ihre Grundgesamtheiten. Da die Elemente in den

Stichproben zufällig sind, sind auch die empirisch ermittelten Zahlenwerte für die Parameter in den Zusammenhangsfunktionen Zufallsgrößen.

Um festzustellen, ob tatsächliche Unterschiede in den Zusammenhangsfunktionen zwischen unterschiedlichen Gruppen vorliegen, müssen Signifikanzuntersuchungen durchgeführt werden. Für lineare Zusammenhänge müssen dazu zwei Parameter, a und b, für den proportionalen Zusammenhang ein Parameter d untersucht werden. Die dazu notwendigen Testverfahren sind in den folgenden Abschnitten dargestellt.

Für die Überprüfung auf signifikante Unterschiede zwischen den jeweiligen Kalibriergeraden der Gruppen werden nicht die Parameter der Kalibriergeraden selbst untersucht, sondern der Unterschied zwischen den zuordenbaren Regressionsgeraden der Gruppen. Das heißt, es werden die ‚extremen‘ Lagen der jeweiligen Kalibriergeraden miteinander verglichen. Können bei diesem Vergleich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Parametern der Regressionsgeraden gefunden werden, dann ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auch für die zwischen diesen Regressionsgeraden liegenden Kalibrierlinien kein signifikanter Unterschied vorhanden.

(2.1) Signifikanzuntersuchung für lineare Ansätze

Bei der Signifikanzuntersuchung wird zunächst für den Vergleich der Regressionsgeraden die Nullhypothese H_0 formuliert. Sie lautet:

H_0 : Die Regressionsgeraden entstammen einer Grundgesamtheit und stimmen für alle x überein.

Entsprechend der Nullhypothese wird die Alternativ- oder Gegenhypothese H_1 formuliert:

H_1 : Die Regressionsgeraden unterscheiden sich mindestens für ein x.

Für die Überprüfung der Nullhypothese werden die Residualwerte $Q_{\text{Res}}^{(1)}$ von Stichprobe 1 mit zugehöriger Regressionsgeraden 1 und $Q_{\text{Res}}^{(2)}$ von Stichprobe 2 mit zugehöriger Regressionsgeraden 2 bestimmt. Danach werden die Stichproben zu einer Gesamtstichprobe vereinigt und an dieser die Regressionsgerade sowie der Residualwert Q_{Res} ermittelt.

Die Residualwerte ermitteln sich zu:

$$Q_{\text{Res}}^{(j)} = \sum_{i=1}^k n_i (\bar{y}_i - b_0 - b_1 x_i)^2 \quad 3.3-28$$

$$Q_{\text{Res}} = \sum_j Q_{\text{Res}}^{(j)} \quad 3.3-29$$

→ $b_0 = a$ und $b_1 = b$ sind die Parameter der Regressionsgeraden

Zur Überprüfung der Nullhypothese wird der Prüfwert

$$P = \frac{(N_1 + N_2 - 4)}{2} \frac{(Q_{\text{Res}} - Q_{\text{Res}}^{(1)} - Q_{\text{Res}}^{(2)})}{Q_{\text{Res}}^{(1)} + Q_{\text{Res}}^{(2)}} \quad 3.3-30$$

→ N_1 = Umfang der Stichprobe 1

→ N_2 = Umfang der Stichprobe 2

ermittelt.

Dieser Prüfwert folgt der F-Verteilung und wird auf dem 5 %-Signifikanzniveau abgesichert. Für die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde in der vorliegenden Arbeit ein Wert von 5 % gewählt. Entsprechend den vorhandenen Freiheitsgraden f_1 und $f_2 = N_1 + N_2 - 4$ wird die Grenze $F_{f_1, f_2, 1-\alpha}$ des Ablehnungsbereiches für H_0 ermittelt. Die Nullhypothese auf Gleichheit der Regressionsgeraden ist zu verwerfen, wenn der Zahlenwert nach 7.4-9 größer ist als $F_{f_1, f_2, 1-\alpha}$. In der Anlage 11.2 sind die Prüfwerte den Grenzwerten und die daraus resultierende Bewertungen gegenübergestellt.

(2.2) Signifikanzuntersuchung für proportionale Ansätze

Wie beim Vergleich der linearen Zusammenhänge wird für den proportionalen Ansatz zunächst die Nullhypothese H_0 formuliert. Sie lautet:

H_0 : Die Regressionsgeraden entstammen einer Grundgesamtheit und stimmen für alle x überein.

Entsprechend wird auch hier die Alternativ- bzw. Gegenhypothese H_1 formuliert. Sie lautet:

H_1 : Die Regressionsgeraden unterscheiden sich mindestens für ein x.

Die Nullhypothese auf Gleichheit der Regressionsparameter wird dann abgelehnt, wenn die Prüfgröße P größer als die Testschranke des Schwellenwertes $t_{f, 1-(\alpha/2)}$ ist.

Die Prüfgröße P berechnet sich gemäß:

$$P = \frac{|b_1 - b_2|}{s_d} \quad 3.3-31$$

Dabei sind b_1 und b_2 die empirisch ermittelten Werte für den Geradenanstieg der proportionalen Zusammenhänge. Der Wert s_d ist ein Streuungsmaß, das die Residualstreuungen der Messwerte berücksichtigt.

$$s_d^2 = \left(\frac{1}{s_{xx}^{(1)}} + \frac{1}{s_{xx}^{(2)}} \right) \frac{(N_1 - 1)s_1^2 + (N_2 - 1)s_2^2}{N_1 + N_2 - 2} \quad 3.3-32$$

Die mit (1) indizierten Variablen sind Werte der ersten Regressionsgeraden, die mit (2) indizierten Variablen entsprechend der zweiten Geraden. Die Formeln für die Größen s_{xx} , s_1 und s_2 können STANGE 1971 entnommen werden und sollen hier nicht näher erläutert werden. Der Schwellenwert $t_{f; 1-(\alpha/2)}$ entstammt der t-Verteilung nach STUDENT für zweiseitige Fragestellung und wird entsprechend den Freiheitsgraden aus einer Tabelle für die t-Verteilung (Irrtumswahrscheinlichkeit 5 %) entnommen.

Die Nullhypothese H_0 wird abgelehnt, wenn

$$P = \frac{|b_1 - b_2|}{s_d} > t_{f; 1-(\alpha/2)} \quad 3.3-33$$

gilt. In der Anlage 11.1 sind die entsprechenden Prüf- und Grenzwerte und deren Bewertungen gegenübergestellt.

(3) Entscheidungsregel

Werden per Test signifikante Unterschiede zwischen den empirisch ermittelten Regressionsgeraden aufgedeckt, so wird die Untersuchung auf Ablehnung der Nullhypothese an den Regressionsgeraden als erstes für die ‚vertikale‘ Blickrichtung und als zweites für die ‚horizontale‘ Blickrichtung geführt, so dass dann zwei Beurteilungsergebnisse vorliegen. Aus diesen einzelnen Beurteilungen wird eine Gesamtbeurteilung gebildet.

Dabei gilt: **Die Ablehnung der Nullhypothese durch einen der beiden Signifikanztests führt zur Ablehnung der Nullhypothese in der Gesamtbeurteilung.**

Wird im Signifikanztest die Nullhypothese verworfen, dann ist zu der vorgegebenen Irrtumswahrscheinlichkeit der signifikante Unterschied zwischen den Gruppen statistisch anzunehmen.

Wird die Nullhypothese in den beiden Ergebnissen nicht verworfen, folgt, dass mit den gewählten Nachweisverfahren keine Unterschiede erkennbar sind. Die Gleichheit der Regressionsparameter folgt daraus jedoch nicht.

3.3.5 Prüfung der Verwendbarkeit ermittelter Zusammenhänge

Die Größe der Residuen ist abhängig von der gewählten Zusammenhangsfunktion f und des Modellfehlers ε . Es ist zu erwarten, dass die spezifischen Funktionen f über Teilmengen gleicher Objekte und unter gleichen Messbedingungen besser angepasst sind als eine Funktion über die gesamte Datenmenge. Die Residualstreuung solcher Funktionen müsste damit geringer sein.

Der deshalb verfolgte Gedanke besteht darin, die Messdaten anhand ihrer messbegleitenden Informationen nach Gruppierungskriterien in Teilmengen bzw. Gruppen zu zerlegen und an diesen Gruppen spezifische Funktionen f_i zu entwickeln. In den anschließenden Untersuchungen werden die Zusammenhangsfunktionen f_i der Gruppen i auf signifikante Unterschiede untersucht. Werden signifikante Unterschiede festgestellt, dann liegen zwischen den Gruppen tatsächlich nicht zufällige Unterschiede in den Funktionen f vor.

(1) Ermittlung von Regressionsgeraden zum Nachweis signifikanter Unterschiede

An den Datengruppen werden jeweils die Regressionsfunktionen f bestimmt, und zwar die Funktionen mit Blickrichtung $X \rightarrow Y$ und $Y \rightarrow X$. Danach werden paarweise die Gruppen zusammengestellt und anschließend auf signifikante Unterschiede zwischen den Funktionen f untersucht. Dabei wird zwischen linearen und proportionalen Ansätzen unterschieden. Die zu untersuchenden Gruppenpaare sind in Tabelle 13 zusammengestellt.

Einfluss der Sollmessgeschwindigkeit	Gruppe G1_40	Gruppe G1_60
	Gruppe G1_60	Gruppe G1_80
	Gruppe G1_40	Gruppe G1_80
Einfluss der Geschwindigkeit auf Asphaltoberflächen	Gruppe G1-1_40	Gruppe G1-1_60
	Gruppe G1-1_60	Gruppe G1-1_80
	Gruppe G1-1_40	Gruppe G1-1_80
Einfluss der Geschwindigkeit auf Betonoberflächen	Gruppe G1-2_40	Gruppe G1-2_60
	Gruppe G1-2_60	Gruppe G1-2_80
	Gruppe G1-2_40	Gruppe G1-2_80
Einfluss des Deckschichtmaterials	Gruppe G2_A	Gruppe G2_B
Einfluss der Textur auf Asphaltoberflächen	Gruppe G3_alle_o	Gruppe G3_alle_g
Einfluss der Geschwindigkeit und der Textur auf Asphaltoberflächen	Gruppe G3_40_o	Gruppe G3_40_g
	Gruppe G3_60_o	Gruppe G3_60_g
	Gruppe G3_80_o	Gruppe G3_80_g
Einfluss der Geschwindigkeit und der Textur auf Betonoberflächen	Gruppe G4_80_o	Gruppe G4_80_m

Tabelle 13: Varianten der Untersuchung auf signifikante Unterschiede (A-Asphalt, B-Beton, o-offen, m-mittel, g-geschlossen)

In den Anlagen A8 und A9 wurde zwischen linearem und proportionalem Ansatz unterschieden. In den Diagrammen sind die Regressionsgeraden unter Berücksichtigung der Residuen für das Prüfmerkmal X und das Prüfmerkmal Y dargestellt. Dazu wurden jeweils in die Variable my^{**} die Werte μ_{SC} und in die Variable my^* die Werte μ_{GT} eingesetzt. Dies gilt für die ‚Blickrichtung $X \rightarrow Y$ ‘. Bei ‚Blickrichtung $Y \rightarrow X$ ‘ wird jeweils in die andere Variable eingesetzt. In den Anlagen A10.1 und A10.2 wurden die Regressionsgleichungen für die anschließende Untersuchung auf signifikante Zusammenhänge zwischen den Gruppen gegenübergestellt.

(2) Untersuchungen auf signifikante Unterschiede zwischen den Regressionsgeraden

Die Methoden auf Feststellung signifikanter Unterschiede zwischen den Regressionsgeraden mit linearem und proportionalem Ansatz unterscheiden sich. Beim zweiparametrischen, linearen Ansatz wird der Prüfwert gegen den Schwellenwert der F-Verteilung getestet, während beim einparametrischen, proportionalen Ansatz der Prüfwert gegen den Schwellenwert der

t-Verteilung getestet wird. Zeigt sich bei den Signifikanzuntersuchungen, dass Gruppen in ihren Regressionsparametern keine signifikanten Unterschiede haben, so können sie statistisch aus einer Grundgesamtheit stammen und werden zu einer gemeinsamen Gruppe zusammengefasst, siehe schematische Darstellung in Abbildung 24. An dieser neuen Gruppe werden die Regressionsparameter wiederholt bestimmt.

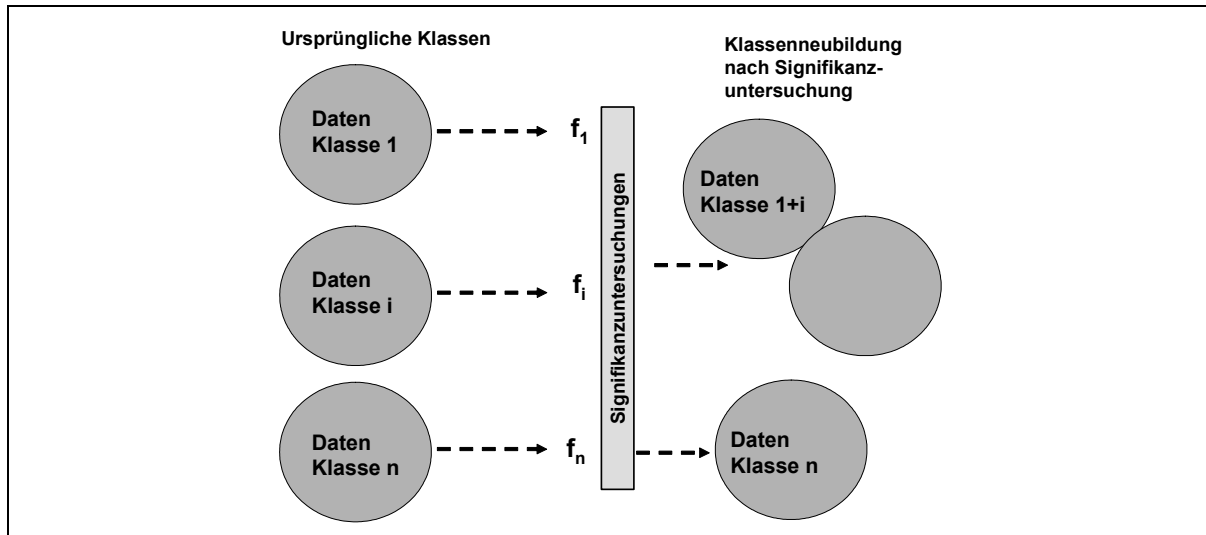


Abbildung 24: Signifikanzuntersuchung und anschließende Neugruppierung der Daten

(2.1) Untersuchung des linearen Modellzusammenhangs

In Anlage A11.2 sind die Ergebnisse der Untersuchungen auf signifikante Unterschiede zwischen den Kalibrierlinien der gebildeten Gruppen zusammengestellt. Aufgrund der Ergebnisse der Signifikanzuntersuchung können für den linearen Modellzusammenhang folgende Hypothesen aufgestellt werden:

Hypothese 1

Der funktionale Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen X und Y ändert sich mit der Geschwindigkeit.

Hypothese 2

Wird der Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen X und Y über alle Geschwindigkeiten formuliert, dann ist dieser Zusammenhang unabhängig vom untersuchten Deckschichtmaterial (Beton/ Asphalt).

Hypothese 3

Der Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen X und Y ist von der Oberflächentextur (offen/ geschlossen) abhängig.

(2.2) Untersuchung des proportionalen Modellzusammenhangs

Für den proportionalen Zusammenhang konnte die Nullhypothese nicht verworfen werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in der Anlage A11.1 enthalten. Für die vorliegende Untersuchung wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen ermittelt. Mit anderen Worten: Es konnten keine gruppenspezifischen Funktionen gefunden werden.

(3) Zusammenfassung der Signifikanzuntersuchungen und Schlussfolgerungen

Die Diskrepanz bei den Ergebnissen der Signifikanzuntersuchung beim linearen und beim proportionalen Ansatz scheint zunächst nicht plausibel, werden doch an Teilmengen mit gleichen Datensätzen für den linearen Ansatz Unterschiede nachgewiesen und für den proportionalen Ansatz nicht. Die Erklärung dafür soll nur phänomenologisch erfolgen:

Die Regressionsgeraden mit proportionalem Modellansatz enthalten lediglich einen Regressionsparameter und die Nebenbedingung des Nulldurchgangs. Die unter dieser Nebenbedingung ermittelte Regressionsgerade ‚passt‘ sich damit generell schlechter an die zu untersuchenden Daten an als die lineare Regressionsgerade. Entsprechend höher sind die Reststreuungen, zu erkennen am geringeren Bestimmtheitsmaß. Die größeren Reststreuungen der proportionalen Ansätze lassen dadurch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Regressionsparametern erkennen.

Für die Diskussion der Unterschiede zwischen den Gruppen werden deshalb die linearen Ansätze verwendet. Die Untersuchungen zu den signifikanten Unterschieden zwischen den Parametern der Kalibrierlinien lassen Folgendes erkennen:

zu Hypothese 1

Die Funktion f_i unterscheiden sich bei Gruppen unterschiedlicher Geschwindigkeit.

zu Hypothese 2

Der Einfluss des Deckschichtmaterials auf den Zusammenhang zwischen X und Y scheint eher gering zu sein.

zu Hypothese 3

Die Ausprägung der Oberflächenstruktur hat einen Einfluss auf den Zusammenhang. Die Parameter für die Kalibrierlinie zwischen offenen und geschlossenen Texturen sind unterschiedlich.

Für die praxisadäquate Ermittlung von Kalibrierlinien sind jedoch nur solche Funktionen verwendbar, bei denen die Gruppierungsparameter auch wertmäßig in den Messungen erfasst werden (Praktikabilitätskriterium). Unter den gegebenen Erkenntnissen ist die Verwendung eines, die Textur beschreibenden, Parameters wünschenswert, aber derzeit nicht möglich. Als Diskriminante eignet sich danach nur die Sollmessgeschwindigkeit, da sie sich leicht ermitteln lässt bzw. bei den Messungen vorgeschrieben ist.

3.3.6 Festlegung der ermittelten Kalibrierlinien

Für die linearen Zusammenhangsfunktionen werden nach der Geschwindigkeit gruppierte spezifische Zusammenhangsfunktionen als Kalibrierlinie gebildet.

Sollmessgeschwindigkeit 40, 60, 80 km/h (Geschwindigkeitsangaben vorhanden)

$$y = 1,4215x - 0,2096 \quad 3.3-34$$

Sollmessgeschwindigkeit 40 km/h

$$y = 1,6710x - 0,5039 \quad 3.3-35$$

Sollmessgeschwindigkeit 60 km/h

$$y = 1,5883x - 0,3359 \quad 3.3-36$$

Sollmessgeschwindigkeit 80 km/h

$$y = 1,2796x - 0,1664 \quad 3.3-37$$

Für den proportionalen Zusammenhang soll nur der Zusammenhang **über alle Geschwindigkeiten** gebildet werden (alle Messfahrten).

$$y = 1,0189x \quad 3.3-38$$

3.4 Transformation der Anforderungswerte

Mit der Transformation der Anforderungswerte des Bewertungssystems der SCRIM auf den GripTester entstehen Anforderungswerte für den GripTester, die von der SCRIM indiziert sind.

Simultan durchgeführte Messungen mit SCRIM und GripTester können danach am Bewertungssystem SCRIM und am Bewertungssystem GripTester bewertet werden. Für einen Relationsvergleich (größer, kleiner oder gleich) sind dann vier Fälle der Bewertung möglich. Diese vier Fälle werden bei der Formulierung des Bewertungssystems GripTester berücksichtigt und in Abschnitt 3.4.1 erläutert.

Für die Übertragung der Anforderungswerte von SCRIM auf GripTester werden zwei unterschiedliche statistische Verfahren verwendet. Im inhaltlichen statistischen Sinne sind beide Verfahren gleichwertig und bieten jeweils Vorteile. Deshalb werden beide Verfahren zur Übertragung verwendet und eine Diskussion der Verfahren wird an den erzielten Ergebnissen vorgenommen.

Die Verfahren zur Übertragung sind nur eine Variationsmöglichkeit bei den Berechnungsläufen. Die Analyse der Berechnungsvoraussetzungen hat gezeigt, dass auch unterschiedliche Funktionen für den BWH SCRIM vorhanden sind.

Zusätzlich wurden klassenspezifische Kalibrierlinien ermittelt. Die Kombination aus allen Variationen ergibt eine Bandbreite möglicher Berechnungsläufe, die auch durchgeführt wurden.

Die Qualität der Ergebnisse aus diesen Berechnungsläufen wurde in einer anschließenden Plausibilitätskontrolle bewertet. Dabei wurde festgestellt, dass einige Berechnungsläufe zu Werten führen, die mit dem bekannten Wissen über die Abhängigkeiten von Griffigkeit zu äußeren Messebedingungen nicht vereinbar sind. Nach einer Ergebnisdiskussion musste die Hypothese über das Vorliegen geschwindigkeitsspezifischer Kalibrierlinien aufgegeben werden. Daraufhin wurden geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinien (proportional und linear) entwickelt und mit diesen die Transformation durchgeführt. Das Vorgehen im Detail wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

3.4.1 Verfahren zur Übertragung der Anforderungswerte vom Prüfmerkmal X auf das Prüfmerkmal Y

(1) Grundlagen der Anforderungswerte

Die Beurteilung der Qualität des Messobjektes anhand von Messwerten ist nicht hinreichend, da nicht entscheidend ist, ob der Messwert eine bestimmte Grenze überschreitet, sondern der ihm zuordenbare wahre Wert. Deshalb ist zunächst generell zu unterscheiden zwischen Anforderungen an Messwerte und Anforderungen an die wahren Werte.

Das bedeutet: Wenn der wahre Wert ξ der Griffigkeit den Grenzwert $G_{\xi, \min}$ übersteigt bzw. der Messwert x des Prüfmerkmals X den Grenzwert $G_{x, \min}$, dann soll die Qualität als ‚gut‘ bzw. erfüllt angenommen werden.

Dabei ist nicht zu erwarten, dass der wahre Wert ξ und der Messwert x im Zahlenwert exakt übereinstimmen. Folgerichtig müssen damit die Zahlenwerte der Grenzwerte G_{ξ} und G_x nicht übereinstimmen.

Formal wird für das Prüfmerkmal Y eine analoge Forderung auf Einhaltung bestimmter Grenzwerte formuliert. Das Messobjekt wird dann mit der Qualität ‚gut‘ beurteilt, wenn der wahre Wert η den Grenzwert $G_{\eta, \min}$ bzw. der Messwert y den Grenzwert $G_{y, \min}$ überschreitet.

Für die weitere Arbeit wird folgende sprachliche Vereinbarung getroffen:

Für den Begriff Grenzwert bzw. Anforderungswert $G_{x, \min}$ (bzw. $G_{y, \min}$) soll der zahlenmäßig unbestimmte Ausdruck als Quantilwert Q_{ξ} , Q_x bzw. Q_{η} , Q_y gesetzt werden. Der Grenzwert ist nur ein spezieller Quantilwert unter Festlegung eines gewählten Prozentsatzes. Der Begriff Quantilwert Q_x (bzw. Q_y) dagegen ist unbestimmt und repräsentiert die verschiedenen möglichen (alle) Grenzwerte. In den Variablen wird zunächst kein Unterschied zwischen Quantilwert und Grenzwert gemacht.

Die Quantilwerte Q_x und Q_y , also die Anforderungen für die Prüfmerkmale X und Y, bilden ein Quantilenpaar (Q_x, Q_y) und zerlegen die zweidimensionale Zahlenebene in vier Entscheidungsquadranten. Je nach Lage eines realisierten Messergebnispunktes (x, y) sind folgende Situationen möglich, siehe Abbildung 25:

Quadrant I: $x \geq Q_x$ und $y \geq Q_y$; das Messobjekt wird als ‚gut‘ bezüglich beider Prüfmerkmale X und Y bewertet.
Quadrant II: $x < Q_x$ und $y \geq Q_y$; das Messobjekt wird als ‚schlecht‘ bezüglich des Prüfmerkmal X und ‚gut‘ bezüglich des Prüfmerkmals Y bewertet.
Quadrant III: $x < Q_x$ und $y < Q_y$; das Messobjekt wird als ‚schlecht‘ bezüglich beider Prüfmerkmale X und Y bewertet.
Quadrant IV: $x \geq Q_x$ und $y < Q_y$; das Messobjekt wird als ‚gut‘ bezüglich des Prüfmerkmals X und als ‚schlecht‘ bezüglich des Prüfmerkmals Y bewertet.

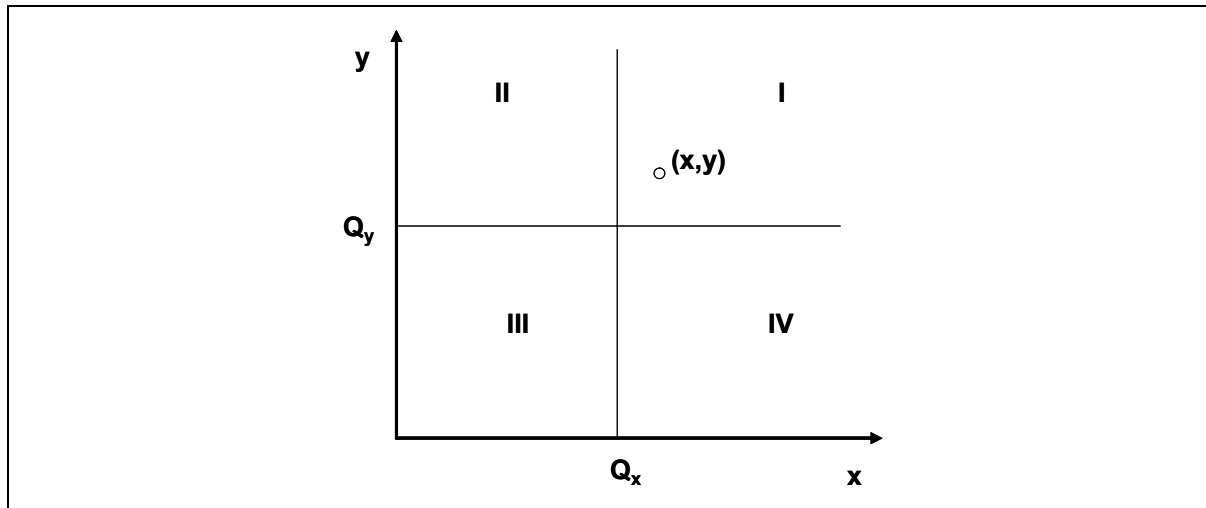


Abbildung 25: Lage eines Datenpunktes zu den Entscheidungsquadranten

Anhand dieser Situationen sollen die möglichen Fälle unter bestimmten Voraussetzungen diskutiert werden.

Fall 1:

Beide Verfahren werden eingesetzt und ein Prüfverfahren wird als primäres Verfahren verstanden.

Ist das Prüfverfahren mit dem Prüfmerkmal X als primäres bzw. maßgebendes Verfahren zu sehen, dann wird für Messwerte mit $x \geq Q_x$ die Beurteilung des Messobjektes bzw. Prüfgegenstandes mit ‚gut‘ erfolgen. Die Beurteilung des Prüfgegenstandes als ‚gut‘ oder ‚schlecht‘ ist unabhängig vom Entscheidungsergebnis für das sekundäre Prüfverfahren.

Fall 2:

Beide Verfahren werden eingesetzt und beide Prüfverfahren sind gleichberechtigt bei der Entscheidungsfindung.

Das Prüfverfahren mit dem Prüfmerkmal X und das Prüfverfahren mit dem Prüfmerkmal Y werden simultan zur Entscheidungsfindung eingesetzt. Nur wenn beide Verfahren zu gleich lautender Beurteilung gelangen, kann der Prüfgegenstand mit ‚gut‘ oder ‚schlecht‘ bewertet werden. Bei entgegengesetzter Beurteilung kann keine eindeutige Zuordnung durchgeführt werden.

Die simultane Anwendung beider Prüfverfahren zur Beurteilung eines Messobjektes ist jedoch keine praxisadäquate Lösung. Der Aufwand wäre meist aus wirtschaftlicher Sicht nicht vertretbar. Ziel der Einführung eines zweiten Verfahrens zur Beurteilung eines

Prüfgegenstandes ist vielmehr der alleinige Einsatz dieses Verfahrens, ohne beide Verfahren immer gleichzeitig einsetzen zu müssen. Diese Überlegung führt zu folgendem Fall:

Fall 3:

Nur ein Verfahren wird eingesetzt. Die Entscheidung über den Prüfgegenstand erfolgt auf der Grundlage reduzierter Informationen.

Wird nur das zweite bzw. Ersatzverfahren eingesetzt, so kommt es unabhängig von der Beurteilung des ersten Verfahrens zu einer Entscheidung. Die Beurteilung mit dem ersten Verfahren ist unbekannt. Wird das erste Verfahren als primäres Verfahren verstanden, dann kann, da die Beurteilung mit diesem Verfahren aufgrund der fehlenden Durchführung unbekannt ist, eine Beurteilung mit dem zweiten Verfahren zu einer Fehlbeurteilung führen. Als Beispiel sei folgende Situation genannt:

Es sei der Messwert $y \geq Q_y$. Damit wird der Prüfgegenstand als ‚gut‘ bezeichnet. Das primäre Verfahren wurde nicht durchgeführt. Wäre es durchgeführt worden, dann wäre im Fall $x \geq Q_x$ der Prüfgegenstand mit ‚gut‘ und für $x < Q_x$ der Prüfgegenstand mit ‚schlecht‘ beurteilt worden. Im Falle gleich lautender Beurteilung wäre die Entscheidung mit dem zweiten Prüfverfahren richtig gewesen. Im Falle gegensätzlicher Beurteilung würde dagegen das zweite Prüfverfahren zu einer Fehlbeurteilung führen.

(2) Umrechnung der Quantilenforderung vom Prüfmerkmal X auf das Prüfmerkmal Y

Ausgangspunkt der nachfolgenden Betrachtungen soll eine simultane Durchführung beider Prüfverfahren sein. Mit der Durchführung beider Prüfverfahren am gleichen Messobjekt entsteht der Datenpunkt (x,y) . Diesem Datenpunkt sind die wahren unbekannten Werte ξ und η der Messgröße bzw. deren Erwartungswerte μ_x und μ_y der Messwerte (x,y) zugeordnet. Es wird davon ausgegangen, dass die jeweiligen Prüfmerkmale X und Y um ihre Erwartungswerte μ_x und μ_y normal verteilt sind. Dann ergibt sich für die Darstellung in der zweidimensionalen Zahlenebene das in Abbildung 26 dargestellte Bild.

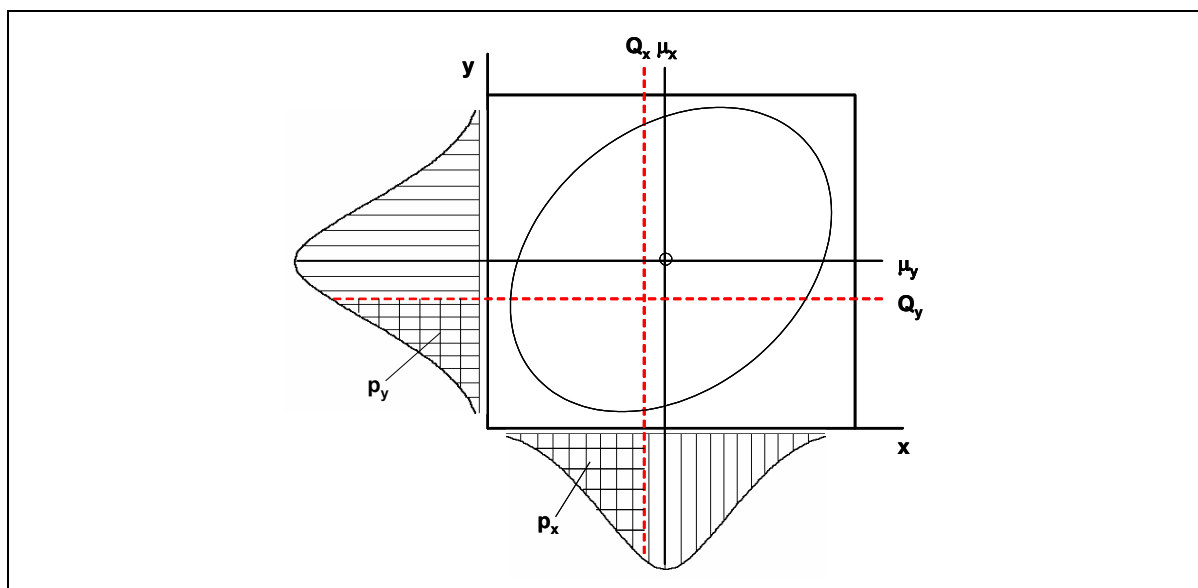


Abbildung 26: Schlechtanteile bei zweidimensionaler Normalverteilung, DEUTLER 2002

Über die Quantilwerte Q_x und Q_y wird in der Verteilung ein Flächenanteil p_x und p_y (in Abbildung 26 kariert dargestellt) eingeschlossen, der als Schlechtanteil der Prüfgröße X bzw. Y bezeichnet wird. Die Flächenanteile repräsentieren die Wahrscheinlichkeit, dass das gemessene Prüfmerkmal kleiner als ein vorgegebener Quantilwert Q_x bzw. Q_y ist.

Die Festlegung der Anforderungen an ein Prüfmerkmal erfolgt durch die Angabe von Mindestquantilwerten $Q_{x, \min}$ oder von Höchstquantilwerten $Q_{y, \max}$. Eine vorgegebene Mindestquantile bzw. Höchstquantile darf höchstens von einem bestimmten Anteil der Einheiten in der Grundgesamtheit unterschritten bzw. überschritten werden. Entsprechend wird beim Prüfmerkmal Griffigkeit davon ausgegangen, dass z.B. maximal 5 % aller Einheiten der Grundgesamtheit unterhalb des festgelegten Mindestquantilwertes (Schwellenwertes) liegen dürfen. Andere Anforderungswerte, z.B. Warnwert oder Zielwert, haben entsprechend andere maximal zulässige Schlechtanteile. Zur Übertragung der Anforderungswerte vom Prüfmerkmal X auf das Prüfmerkmal Y kann die Kalibrierlinie genutzt werden. Zum minimal zulässigen Quantilwert Q_x existiert ein maximal zulässiger Schlechtanteil $p_{x, \max}$. Zu diesen Werten sind die technisch adäquaten Werte für das Prüfmerkmal Y , nämlich Q_y und $p_{y, \max}$ gesucht. Für die Übertragung dieser Werte auf das Prüfmerkmal Y stehen verschiedene statistische Methoden zur Verfügung, die unterschiedliche Vor- und Nachteile aufweisen. Diese Methoden werden in den folgenden Abschnitten erörtert.

(3.1) Verfahren A zur Übertragung von Anforderungswerten

Da beim Prüfmerkmal Griffigkeit die Erfüllung einer Mindestanforderung überprüft wird und die Betrachtungen für das Merkmal X analog zum Merkmal Y sind, werden die folgenden Überlegungen im Bezug auf die Mindestquantilforderungen $Q_{x, \min}$ für das Merkmal X dargestellt.

Mit Ermittlung der Regressionsgeraden und Kalibrierlinien wurde der technische Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen ermittelt. Schnittpunkt aller Geraden ist der Erwartungswert (μ_x, μ_y) der Verteilungen für SCRIM und GripTester. Einem maximal zulässigen Schlechtanteil $p_{x, \max}$ ist ein Quantilwert $Q_{x, \min}$ zugeordnet. Entsprechend ist das Bewertungssystem der SCRIM aufgebaut, in dem durch Festlegung von Schlechtanteilen die zuordenbaren Quantilwerte aus der Verteilung abgelesen werden. Der Zusammenhang zwischen dem Mindestanforderungswert $Q_{x, \min}$ und dem Erwartungswert μ_x ist über die Standardabweichung des Prüfmerkmals σ_x festgelegt.

$$\mu_x^Q = Q_{x, \min} + z^Q \sigma_x \quad 3.4-1$$

Der Wert z^Q richtet sich nach dem maximal zulässigen Schlechtanteil $p_{x, \max}$. Für $p_{x, \max} = 5 \%$ gilt bei einseitiger Fragestellung $z^Q = 1,65$.

Bei linearem Zusammenhang zwischen den Größen der Merkmale X und Y gilt:

$$\mu_y = \alpha + \beta \mu_x \quad 3.4-2$$

Entsprechend der Gleichung 3.4-1 wird der Zusammenhang für das Prüfmerkmal Y formuliert. Es gilt:

$$\mu_y^Q = Q_{y, \min} + z^Q \sigma_y \quad 3.4-3$$

Nach dem zu untersuchenden Grenzfall einer „gerade noch zulässigen“ Qualität für beide Verfahren des Prüfgegenstandes sind die maximal zulässigen Schlechtanteile $p_{x, \max}$ und $p_{y, \max}$ gleich groß, das heißt die Formulierung der Anforderung an das Prüfmerkmal Y soll genauso sein wie beim Prüfmerkmal X. Wenn der Schwellenwert für die SCRIM mit einem maximal zulässigen Schlechtanteil $p_{x, \max}$ von 5 % festgelegt ist, dann ist für den GripTester die Festlegung eines maximal zulässigen Schlechtanteils $p_{y, \max}$ von ebenfalls 5 % technisch adäquat.

Das jedoch damit verbundene Problem wird in Abbildung 27 deutlich: Die unterschiedlichen Merkmalsstreuungen σ_x und σ_y führen dazu, dass die Transformation $\alpha + \beta Q_x$ im Allgemeinen nicht zum gesuchten Quantilwert Q_y führt, der unter Berücksichtigung des technischen Zusammenhangs und anhand der Merkmalsstreuungen ermittelt wurde.

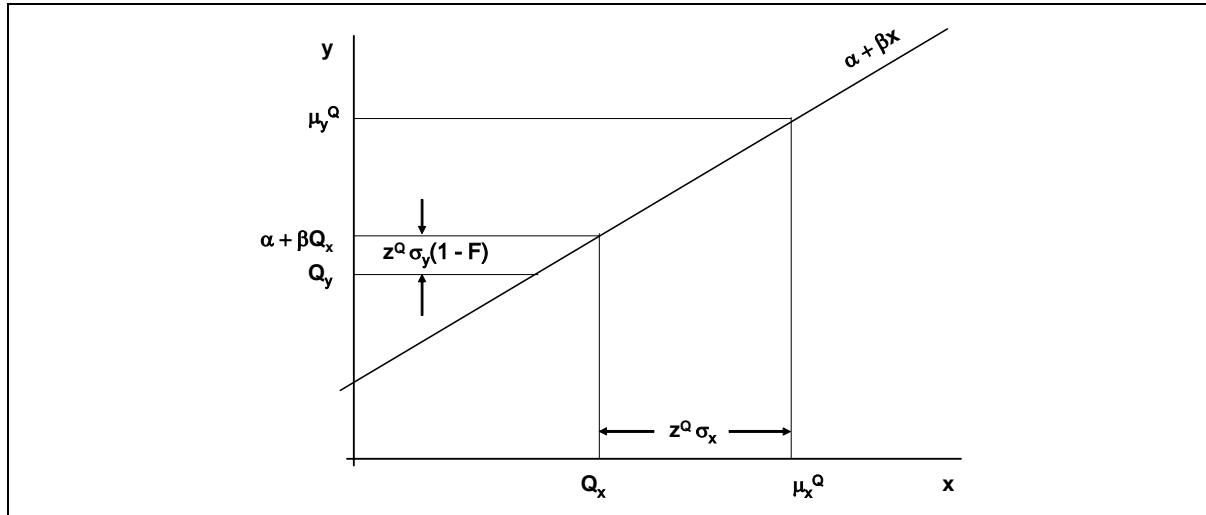


Abbildung 27: Bestimmung des Quantilwertes Q_y aus dem Quantilwert Q_x bei geforderter Gleichheit der Schlechteile $p_{x, \max}$ und $p_{y, \max}$ für den Grenzfall gerade noch akzeptabler Qualität, DEUTLER 2002

Sollen die Schlechteile im Grenzfall übereinstimmen, lässt sich der Quantilwert Q_y nicht einfach durch direkte Transformation der Anforderungswerte über die Kalibrierlinie der beiden Prüfmerkmale bestimmen. Wie in DEUTLER 2000 hergeleitet, wird der Zusammenhang zwischen Q_y und Q_x dargestellt durch:

$$Q_y = (\alpha + \beta Q_x) + z^Q \sigma_y [1 - F]. \quad 3.4-4$$

Dabei ist der Faktor F gegeben durch:

$$F = \beta \left(\frac{\sigma_x}{\sigma_y} \right). \quad 3.4-5$$

Dann ist der allgemeine Zusammenhang zwischen den Schlechteilen p_x und p_y mit der Verteilungsfunktion Φ der Normalverteilung beschrieben.

$$p_y = \Phi \left(F \Phi^{-1}(p_x) + z^Q * (1 - F) \right) = h_A(p_x). \quad 3.4-6$$

In Abbildung 28 wird der Zusammenhang zwischen den Schlechteilen p_x und p_y in Abhängigkeit vom Parameter F verdeutlicht. Hier ist zu erkennen, dass die Gleichheit der Schlechteile nur ein Spezialfall ist.

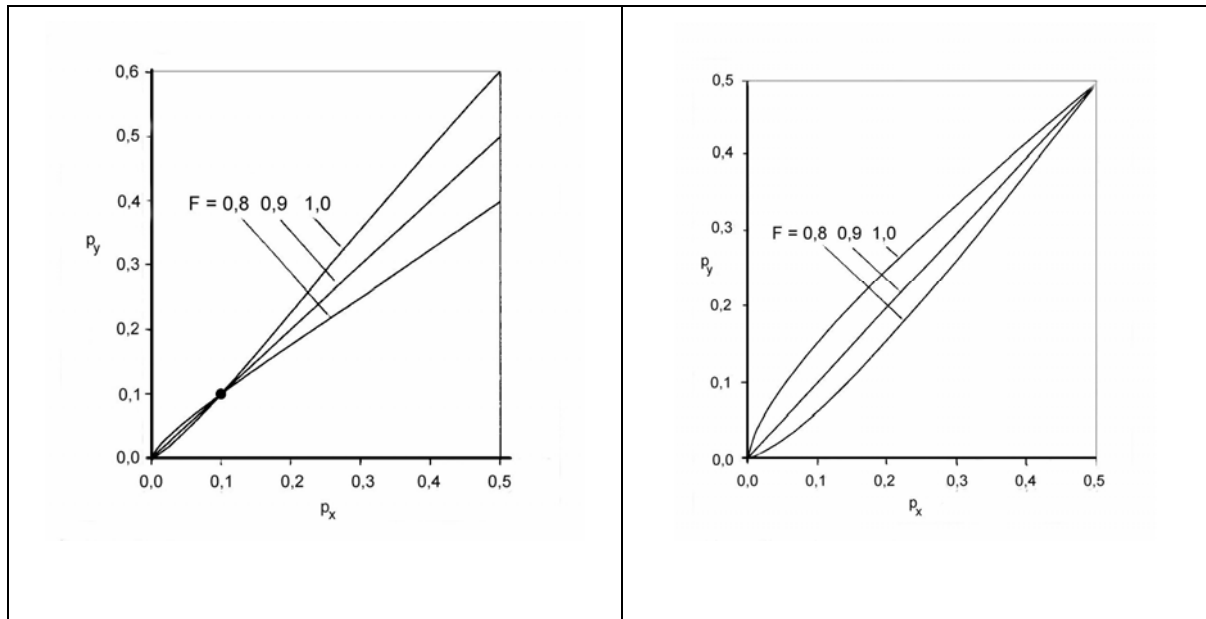


Abbildung 28: Zusammenhang zwischen p_x und p_y nach links: Verfahren A und rechts: Verfahren B, DEUTLER 2002

Der Zusammenhang zwischen den Schlechteilen beider Prüfmerkmale ist nur für $F = 1$ eine Gerade mit dem Anstieg $m = 1$. Für die Fälle $F < 1$ und $F > 1$ weicht der Zusammenhang von einer Geraden ab.

Schlussfolgerung: Bei adäquater Formulierung des Bewertungssystems des GripTesters zur SCRIM ist eine Übereinstimmung der Schlechteile anzustreben. Dann muss jedoch für jeden betrachteten Schlechteil in der Übertragung eine andere Übertragungsfunktion h_A definiert werden.

(3.2) Verfahren B zur Übertragung von Anforderungswerten

Das Verfahren B geht von einer „direkten“ Übertragung der Quantilwerte mittels Kalibrierlinie von einem auf das andere Prüfmerkmal aus.

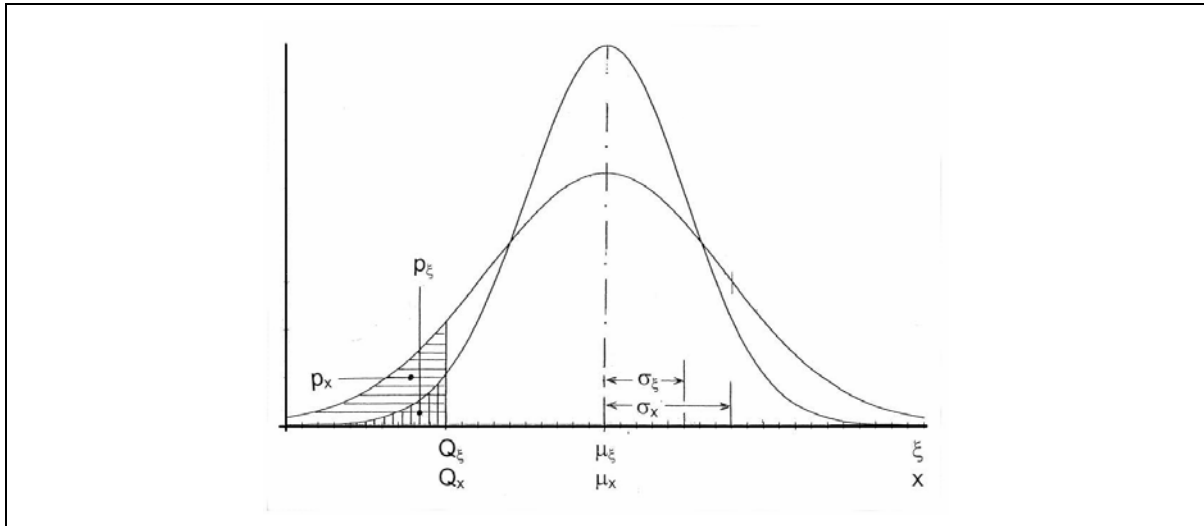


Abbildung 29: Relation zwischen den Schlechteanteilen p_x und p_ξ bei Gleichheit der Quantile, DEUTLER 2002

Es gilt danach der Zusammenhang:

$$Q_\eta = \alpha + \beta Q_\xi. \quad 3.4-7$$

Die maßgebenden Quantilwerte für das Prüfmerkmal Y lassen sich leicht über die Kalibrierlinie bestimmen. Dabei ist zu beachten, dass durch die direkte Übertragung der Quantilwerte die geforderte Gleichheit der Schlechteanteile nicht gewährleistet ist. Der Punkt der Erwartungswerte (μ_x, μ_y) liegt auf der Kalibrierlinie. Den Erwartungswerten ist gemeinsam, dass ihr „Schlechteanteil“ 50 % beträgt. Infolge unterschiedlich großer Merkmalsstreuungen σ_x und σ_y werden die Schlechteanteile einer direkt von Q_x nach Q_y übertragenen Anforderung nicht übereinstimmen.

Der Zusammenhang zwischen den Schlechteanteilen des Prüfmerkmals X und des Prüfmerkmals Y wird über die Funktion h_B beschrieben. Es gilt

$$p_y = h_B(p_x) = \Phi\left(\left(\beta \frac{\sigma_x}{\sigma_y}\right) \Phi^{-1}(p_x)\right), \quad 3.4-8$$

wobei Φ die Verteilungsfunktion der Standardnormalverteilung ist.

Die Funktion h_B ist für verschiedene Werte von F in Abbildung 26 dargestellt.

In Abbildung 28 zeigt sich, dass im allgemeinen Fall für $F \neq 1$ die Gleichheit der Schlechteanteile p_x und p_y nur für zwei Grenzfälle erreicht werden kann. Die Schlechteanteile sind dann gleich, wenn sie jeweils Null sind oder wenn sie 0,5 betragen. Die Fälle $p_x = p_y = 0$ wie auch $p_x = p_y = 0,5$ sind nicht praxisrelevant.

Schlussfolgerung: Während bei Verfahren A die Kenntnis des Parameters $F = \sigma_x/\sigma_y$ und damit der Standardabweichungen σ_x und σ_y und der Steigung β notwendig ist, muss beim Verfahren B lediglich der funktionale Zusammenhang zwischen den Prüfmerkmalen X und Y bekannt sein. Vorausgesetzt das Bewertungssystem GripTester soll nicht die gleiche Anforderung bezüglich der Größe der Schlechtanteile aufweisen wie das Bewertungssystem SCRIM, können mit dem Verfahren B die Anforderungen einfach mit der Kalibriergeraden übertragen werden. Es stellt sich aber die Frage, ob die im Grenzfall unterschiedlichen Schlechtanteile des Bewertungssystems GripTester im Gegensatz zum Bewertungssystem SCRIM technisch sinnvoll und erwünscht sind. Die Anwendung des Verfahrens B führt zwar zu schnell ermittelbaren Quantilwerten, jedoch mit dem Nachteil, dass die diesen Quantilwerten zugeordneten Schlechtanteile nicht übereinstimmen.

(4) Diskussion zu den Verfahren A und B

Die Quantilwerte für das Bewertungssystem SCRIM resultieren aus dessen BWH und sind über vorgegebene Schlechtanteile determiniert. Ausgehend von der Voraussetzung, dass mit beiden Messsystemen die Unterscheidung zwischen geringen und hohen Griffigkeiten übereinstimmend möglich ist, muss eine Gruppe von Streckenabschnitten, die nach bestimmten Kriterien mit der SCRIM als „schlecht“ bzw. „gut“ identifiziert wurden, auch durch den GripTester als „schlecht“ bzw. „gut“ identifiziert werden.

Mit anderen Worten: Wird laut Definition der Anforderungen an den BWH SCRIM eine Anzahl von Strecken in ihrer Qualität als nicht ausreichend eingeschätzt, so muss der GripTester ebenso in der Lage sein, genau diese Anzahl an Strecken als „schlecht“ zu bestimmen.

Werden jedoch mit einem statistischen Verfahren Quantilwerte von der SCRIM auf den GripTester übertragen, bei denen die Schlechtanteile nicht gleich sind (Verfahren B), dann muss davon ausgegangen werden, dass in der konkreten Messsituation auch eine unterschiedliche Anzahl an Strecken als „schlecht“ bzw. „gut“ identifiziert wird.

Die Betrachtungen zu den beiden Möglichkeiten der Übertragung der Quantilwerte zeigen, dass unterschiedliche statistische Verfahren existieren und diese zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

3.4.2 Ermittlung der statistischen Grundlagen für die Übertragung der Anforderungswerte

Die Forderung nach Übereinstimmung des statistischen Modells im BWH des GripTesters und der SCRIM bedingt, die Schlechtanteile im Bewertungshintergrund der SCRIM zu berücksichtigen (Verfahren A). Dazu werden die derzeitigen Anforderungswerte SCRIM im Zusammenhang mit den Griffigkeitsverteilungen im Straßennetz betrachtet. Die Anforderungswerte werden aus den Anforderungen im Bauvertrag und der MBGriff-StB entnommen. Betrachteter Bewertungshintergrund sind zunächst die von BECKER 1992 aufgestellten Griffigkeitsverteilungen und in der weiteren Betrachtung die Verteilungen von Klinghammer/ Gast.

Für diese Betrachtung werden die Verteilungen für 40, 60 und 80 km/h einbezogen, wobei zu bemerken ist, dass die Quantilwerte für die Verteilungen bei 40 und 60 km/h aus der Verteilung für 80 km/h über die Griffigkeitsmesswert–Geschwindigkeitsabhängigkeit abgeleitet wurden. Die Anforderungswerte der SCRIM werden als Quantilwerte betrachtet und unter der Annahme der Normalverteilung die zugehörigen Perzentilwerte bzw. Werte für die Schlechtanteile ermittelt. Die Perzentilwerte werden aus folgender Gleichung bestimmt:

$$F(x_p; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{-\infty}^{x_p} e^{-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}} dz = p. \quad 3.4-9$$

Die Werte μ und σ sind die Parameter der Verteilung, x_p der entsprechende Quantilwert.

	Sollmessgeschwindigkeit					
	40 [km/h]		60 [km/h]		80 [km/h]	
	Quantil Q_x	Perzentil p_x	Quantil Q_x	Perzentil p_x	Quantil Q_x	Perzentil p_x
Zustandswert 1,0	0,66	55	0,61	70	0,56	75
Zustandswert 1,5 (Zielwert)	0,63	41	0,58	57	0,53	63
Zustandswert 2,0	0,59	23	0,54	39	0,49	46
Zustandswert 3,0	0,52	5	0,47	14	0,42	19
Zustandswert 3,5 (Warnwert)	0,49	2	0,44	7	0,39	11
Zustandswert 4,0	0,45	1	0,40	3	0,35	5
Zustandswert 4,5 (Schwellenwert)	0,42	0	0,37	1	0,32	2

	Sollmessgeschwindigkeit					
	40 [km/h]		60 [km/h]		80 [km/h]	
	Quantil Q_x	Perzentil p_x	Quantil Q_x	Perzentil p_x	Quantil Q_x	Perzentil p_x
Zustandswert 5,0	0,38	0	0,33	0	0,28	1
Abnahmewert ZTV (Ausgabe 2001)	0,56	13	0,51	26	0,46	33
Ablauf der Verjährungsfrist für die Gewährleistung ZTV (Ausgabe 2001)	0,52	5	0,48	16	0,43	22

Tabelle 14: Zuordnung der Quantilwerte zu Perzentilen für das Messverfahren SCRIM auf der Grundlage des Bewertungshintergrundes nach BECKER 1992, M BGriff, ZTV Asphalt-StB und ZTV – Beton-StB

Die Werte nach Gleichung 3.4-9 sind eine Abbildung der Griffigkeitsverteilung im Bundesautobahnnetz in Deutschland zum Zeitpunkt 1992. Damit könnte grundsätzlich der formale Einspruch erfolgen, dass das Datenmaterial für diese Betrachtung nicht mehr der aktuellen Griffigkeitsverteilung im Netz entspricht.

3.4.3 Umsetzung der Transformation der Anforderungswerte von SCRIM auf GripTester

In die Untersuchung wurden unterschiedliche Auswertestränge berücksichtigt. Die Variation bezieht sich auf:

- Verschiedene Ausprägungen des BWH SCRIM
- Proportionaler und linearer Ansatz der Kalibrierlinien
- Verfahren A und B zur Transformation
- Betrachtung von Datenmengen mit gleicher Elementenanzahl (paritätisch) und ungleicher Elementenanzahl (nicht paritätisch)
- Transformationen unter Berücksichtigung von Daten mit Angabe der Sollmessgeschwindigkeit und Daten ohne Angabe der Sollmessgeschwindigkeit

(1) Variation im Datenmaterial im BWH SCRIM

Der Bewertungshintergrund von Klinghammer/ Gast unterscheidet sich vom Bewertungshintergrund BECKER 1992 im Umfang der Datenmengen und den untersuchten

Abhängigkeiten. In der Folge liegen mit dem BWH Klinghammer/ Gast und Becker unterschiedliche Verteilungsfunktionen vor. Die Verteilungsfunktionen von Klinghammer/ Gast zeigen bereits Abhängigkeiten vom Oberflächenmaterial. Es stellt sich die Frage, welchen Einfluss die Variation der Verteilungsfunktionen auf die Anforderungswerte vom GripTester hat. Um ein „Gefühl“ für die Auswirkung unterschiedlicher Verteilungsfunktionen auf die Größe der Quantilwerte für den GripTester zu erhalten, wurden deshalb unterschiedliche Verteilungsfunktionen der SCRIM zur Übertragung verwendet.

Die Übertragung wurde mit den linearen und proportionalen Ansätzen durchgeführt. Dabei wurde die Übertragung nach Verfahren A, aber auch Verfahren B durchgeführt. Die Ergebnisse für den Bewertungshintergrund nach Becker sind für das Verfahren A in den Anlagen A13.1 bis A13.1c und für das Verfahren B in den Anlagen A13.2 bis A13.2c dargestellt. Die ausgewählten Verteilungsfunktionen sind:

- Griffigkeitsverteilung SCRIM, 80 km/h nach Becker
- Griffigkeitsverteilung SCRIM, 80 km/h, Asphaltdeckschicht alte Bundesländer nach Klinghammer/ Gast
- Griffigkeitsverteilung SCRIM, 80 km/h, gesamt alte Bundesländer nach Klinghammer/ Gast
- Griffigkeitsverteilung SCRIM, 80 km/h, gesamt alte und neue Bundesländer nach Klinghammer/ Gast.

(2) Die Übertragung der Anforderungswerte und Vergleich mit dem Bewertungshintergrund GripTester

Nach den obigen Betrachtungen zeigte sich, dass die Wahl des BWH SCRIM, aus dem die Perzentilwerte der SCRIM ermittelt wurden, nur einen geringen Einfluss auf die Größe der Quantilwerte des GripTesters hat.

Für die weiteren Betrachtungen wird deshalb der Bewertungshintergrund von BECKER 1992 als Grundlage gewählt.

Für einen vorgegebenen Quantilwert des Prüfverfahrens SCRIM (Zustandsnote 1,5) ist der Anforderungswert für die SCRIM mit 0,63 bei 40 km/h angegeben. Bei Bestimmung der Anforderungswerte für den GripTester wurde u.a. die Datenbasis entsprechend der gebildeten Datenklassen variiert. Auf die unterschiedlichen Datenklassen wurden die Übertragungsverfahren (A und B) und die funktionalen Ansätze (linear, proportional) variierend angewendet siehe Anlage 13.

Bei Verwendung des Verfahrens A mit einem linearen Ansatz beispielsweise führte dies nach der Transformation zu unterschiedlichen Anforderungswerten für den GripTester. Nach Transformation beispielsweise für die Anforderungswerte bei 40 km/h ergeben sich die Werte 0,55 (A13.1), 0,69 (A13.1a), 0,60 (A13.1b) und 0,61 (A13.1c).

Da aus statistischer Sicht keine Entscheidung für eine der Übertragungsmöglichkeiten getroffen werden kann, muss eine Entscheidung auf der Grundlage ingenieurtechnischer Überlegungen fallen. Dazu ist zu prüfen, ob das ermittelte Ergebnis auch hinreichend plausibel ist. Eine Plausibilitätskontrolle wurde durch den Vergleich der übertragenen Anforderungswerte vor dem vorläufigen Bewertungshintergrund der TUD für den GripTester geführt. Die aus dem vorläufigen Bewertungshintergrund des GripTesters ermittelten Quantilwerte sind in der Anlage A14 dargestellt. Für die Ermittlung der Quantilwerte aus den Griffigkeitsverteilungen für den GripTester wurde die Normalverteilung der Messwerte angenommen. Die am BWH GripTester ermittelten Quantilwerte werden als dreieckige Punkte in folgender Graphik dargestellt. Als Beispiel ist die Gegenüberstellung des linearen und proportionalen Ansatzes für die Sollmessgeschwindigkeit 40 km/h in Abbildung 30 dargestellt.

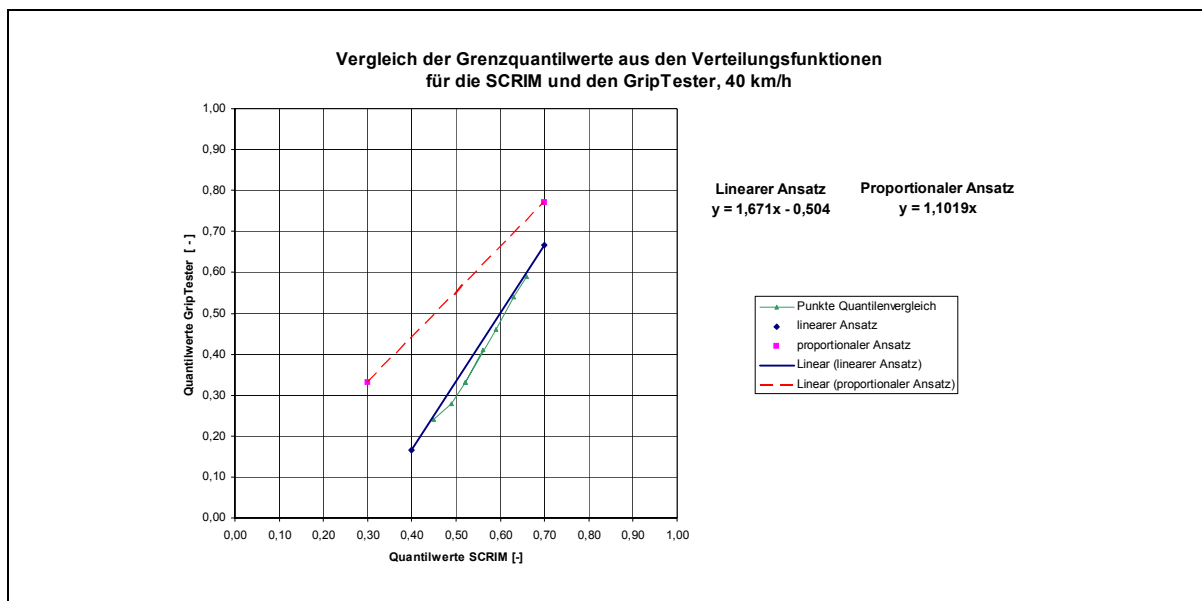


Abbildung 30: Vergleich der Kalibrierlinien mit den Anforderungswerten aus dem BWH des GripTesters für 40 km/h ohne Gleichheit der Schlechtanteile, Verfahren A

Der Vergleich für die Geschwindigkeitsklassen 60 und 80 km/h ist in Anlage A15 dargestellt. Es zeigt sich, dass die linearen Kalibrierlinien in allen Geschwindigkeitsklassen besser an die Anforderungswerte angepasst sind als die proportionalen Kalibrierlinien. Diese Beobachtung ist nicht überraschend, da der lineare Zusammenhang mit einem weiteren Modellparameter, nämlich dem Achsenabschnitt, eine bessere Anpassung an die Daten ermöglicht.

(3) Die Anwendung klassenspezifischer Kalibrierlinien und ihre Wirkung auf die Anforderungswerte

Die Gesamtmenge aller Messdaten wurde in Gruppen von Messdaten gleicher Sollmessgeschwindigkeit zerlegt und daran die Kalibrierlinien ermittelt siehe Abschnitt 3.2 und Abschnitt 3.3.6. Aus diesen Gruppen wurden Teilgruppen gebildet, die eine gleiche Elementenanzahl aufweisen (Parität). Auch zu diesen Gruppen wurden Kalibrierlinien ermittelt.

Die Gruppen wurden nach folgenden Kriterien aufgebaut:

1. In der Gruppe sind alle Elemente enthalten, unabhängig davon, ob eine Angabe für die Messgeschwindigkeit vorliegt oder nicht.
2. In den Gruppen sind jeweils nur die Elemente enthalten, für die Sollmessgeschwindigkeiten bekannt waren. Die Gruppen sind danach jeweils mit der Sollmessgeschwindigkeit 40, 60 und 80 km/h indiziert.
3. Die paritätischen Teilgruppen haben die gleiche Elementenanzahl. Es wurden drei Teilgruppen für Messwerte mit einer Sollmessgeschwindigkeit von 40 km/h, 60 km/h und 80 km/h gebildet. In diesen Gruppen sind nur Elemente enthalten, für die eine Angabe der Sollmessgeschwindigkeit vorhanden war. Die Auswahl von Elementen in diese Gruppen erfolgte nach dem Zufallsprinzip. Die Teilgruppen haben die gleiche Anzahl an Elementen.

Anschließend wurde die Transformation der Anforderungswerte von der SCRIM auf den GripTester vorgenommen. Folgende Fälle wurden dabei unterschieden:

- | | |
|-------------------|--|
| A13.1 und A13.2 | Übertragung der Anforderungswerte mit geschwindigkeits-abhängigen Funktionen f_{40} , f_{60} , f_{80} , ermittelt aus allen verfügbaren Messwerten |
| A13.1a und A13.2a | Übertragung der Anforderungswerte mit geschwindigkeits-unabhängigen Funktionen $f_{40,60,80}$, ermittelt aus allen verfügbaren Messwerten |
| A13.1b und A13.2b | Übertragung der Anforderungswerte mit geschwindigkeits-unabhängigen Funktionen $f_{40,60,80}$, ermittelt aus Messwerten, für die eine Geschwindigkeit angegeben werden konnte |
| A13.1c und A13.2c | Übertragung der Anforderungswerte mit geschwindigkeits-unabhängigen Funktionen $f_{40p,60p,80p}$, ermittelt aus Messwerten, |

für die eine Geschwindigkeit angegeben werden konnte und die paritätisch verteilt sind

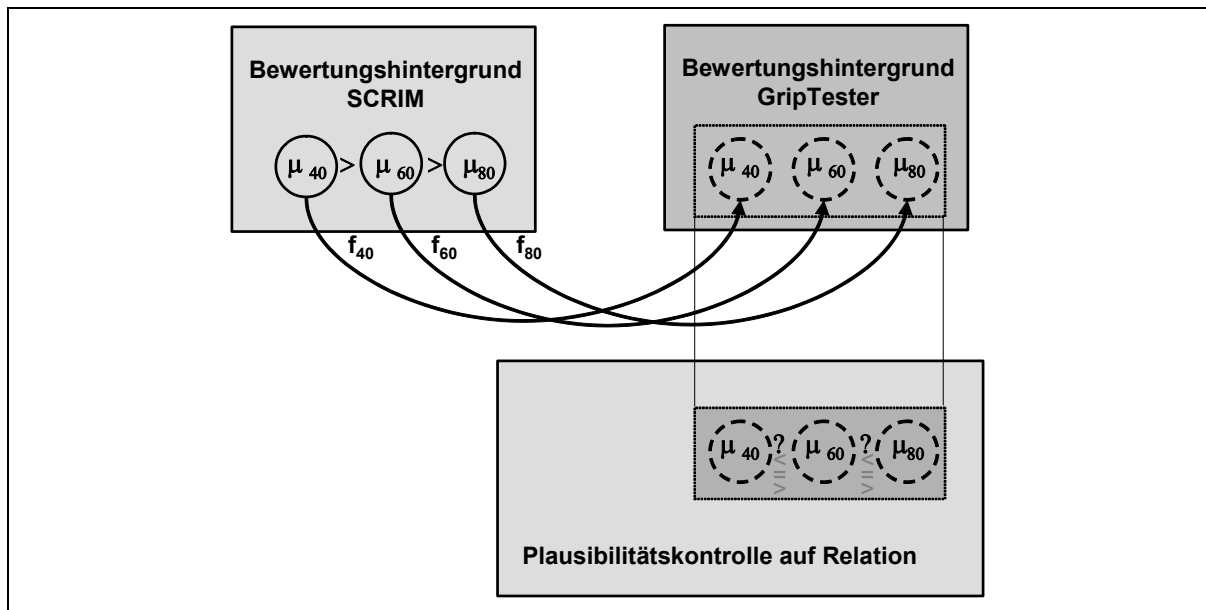


Abbildung 31: Transformation der Anforderungswerte der SCRIM auf den GripTester

Die Richtigkeit der einzelnen Transformationen mit Kalibrierlinie kann nicht überprüft werden. Durch den Vergleich der entstandenen Transformationsergebnisse GT miteinander ist jedoch eine Plausibilitätskontrolle möglich. Dabei wird überprüft, ob die ermittelten Werte mit dem vorhandenen Wissen zum Verhalten von Griffigkeitsmesswerten vereinbar sind.

Bekannt ist, dass das Messwertniveau von der Messgeschwindigkeit abhängig ist. Je größer die Messgeschwindigkeit ist, desto geringer muss beim gleichen Messobjekt der Wert des ermittelten Ergebnisses sein. Entsprechend muss das Bewertungssystem der SCRIM dieser Geschwindigkeitsabhängigkeit folgen. Daraus folgt auch für das Bewertungssystem des GripTesters, dass mit höheren Geschwindigkeiten die Quantilwerte kleiner werden müssen.

Dies bedeutet zum Beispiel: Der Abnahmewert der SCRIM beträgt bei 40 km/h 0,56, bei 60 km/h 0,51 und bei 80 km/h 0,46. Diese Werte spiegeln einen mittleren statistischen Zusammenhang wider. Ohne die konkreten Differenzen zwischen den Anforderungswerten zahlenmäßig zu betrachten, ist festzustellen, dass zwischen den Anforderungswerten qualitativ die oben erwähnte Relation besteht.

Relation:

→ **Die Griffigkeitswerte unter Vergleichbedingung eines konkreten Streckenabschnittes sinken mit steigender Messgeschwindigkeit.**

Es wird angenommen, dass diese Relationen ebenfalls beim GripTester gelten. Die zeilenweise Betrachtung der transformierten Anforderungswerte aller Messdaten mit den Kalibrierlinien in der Anlage A13 zeigt aber, dass diese Relationen verletzt werden Anlage A13.2. Für den **Zustandswert 1,5** bleibt die Relation zwischen den Anforderungswerten nach der Transformation noch erhalten:

Zustandsnote	40 km/h	60 km/h	80 km/h
1,5	0,55	0,53	0,51

Tabelle 15: Übertragene Anforderungswerte für den GripTester für einen Zustandswert von 1,5 nach Anlage A13.2, linearer geschwindigkeitsspezifischer Ansatz, Verfahren A

Werden hingegen die übertragenen Anforderungswerte in der gleichen Tabelle für den **Zustandswert 4,5** betrachtet, so ergeben sich folgende Werte, bei denen die Relationen nicht erhalten bleiben:

Zustandsnote	40 km/h	60 km/h	80 km/h
4,5	0,20	0,17	0,24

Tabelle 16: Übertragene Anforderungswerte für den GripTester für einen Zustandswert von 4,5 nach Anlage A13.2, linearer geschwindigkeitsspezifischer Ansatz, Verfahren A

Die Ergebnisse der Transformation sind damit nicht mit dem bekannten Wissen über die Geschwindigkeitsabhängigkeit der Messwerte vereinbar und daher nicht plausibel.

Transformationsergebnisse und Schlussfolgerungen: Sowohl die Transformation nach Verfahren A als auch die Transformation nach Verfahren B führen zu nicht plausiblen Werten. Es wird davon ausgegangen, dass nicht die statistischen Verfahren (Verfahren A und B), sondern die Übertragungsfunktionen die Ursache für die Störungen der Relation sind $\{\Delta M\}$. Die Übertragungsfunktionen sind nur an Stichproben mit begrenztem Umfang ermittelt worden. Die Parameter der Kalibrierlinien sind entsprechend nur begrenzt „sicher“ und streuen. Diese Streuungen verursachen wiederum eine Unsicherheit bei den übertragenen Anforderungswerten.

Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass die durch die Klassenbildung entstandenen Teilmengen nicht repräsentativ für die geschwindigkeitsspezifischen Verteilungen der Griffigkeit im Straßennetz sind. Bei Betrachtung der Diagramme in Anlage A1 und A2 sind Ballungen von Griffigkeitswerten und Abweichungen von der Kalibriergeraden erkennbar, die mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht zufällig sind. Somit sind die vorhandenen Messdaten offensichtlich nicht ausreichend repräsentativ, um klassenspezifische Kalibrierlinien zu definieren.

Die Hypothese auf Ermittelbarkeit geschwindigkeitsspezifischer Kalibrierlinien wurde deshalb aufgegeben und stattdessen wurden geschwindigkeitsunabhängige Funktionen verwendet $\{\Delta M\}$.

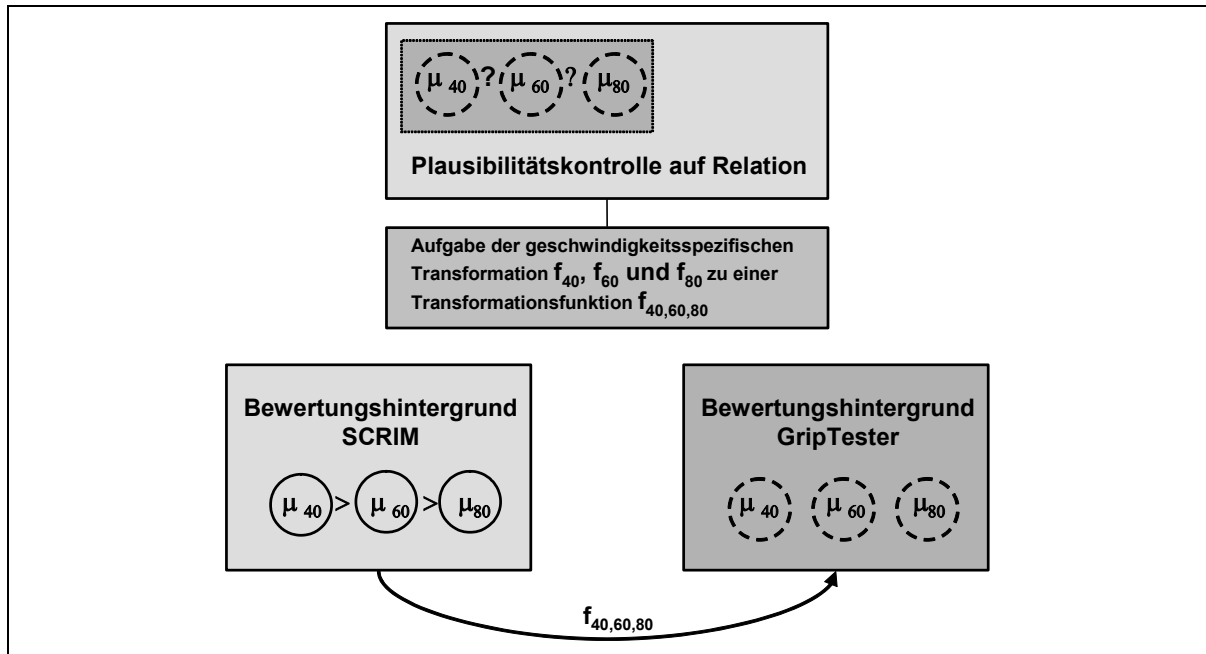


Abbildung 32: Vereinbarung einer geschwindigkeitsunabhängigen Transformationsgleichung als Schlussfolgerung aus der Plausibilitätsüberprüfung

Es werden deshalb Datenmengen betrachtet, in denen alle Geschwindigkeitsklassen enthalten sind. Folgende Mengen werden unterschieden:

- (1) Alle verfügbaren Messwerte mit und ohne Geschwindigkeitsangaben (Menge A).
- (2) Aller Messwerte, für die Geschwindigkeitsangaben vorhanden sind (Menge B). B ist eine echte Teilmenge von A, siehe Abbildung 33.
- (3) Alle Messwerte, für die Geschwindigkeitsangaben vorhanden sind, jedoch mit paritätischer Verteilung der Messdaten in den Klassen, das heißt gleiche Messwertanzahl in den Klassen (Menge C an betrachtbaren Daten). C ist damit eine Teilmenge oder echte Teilmenge von B, siehe Abbildung 34.

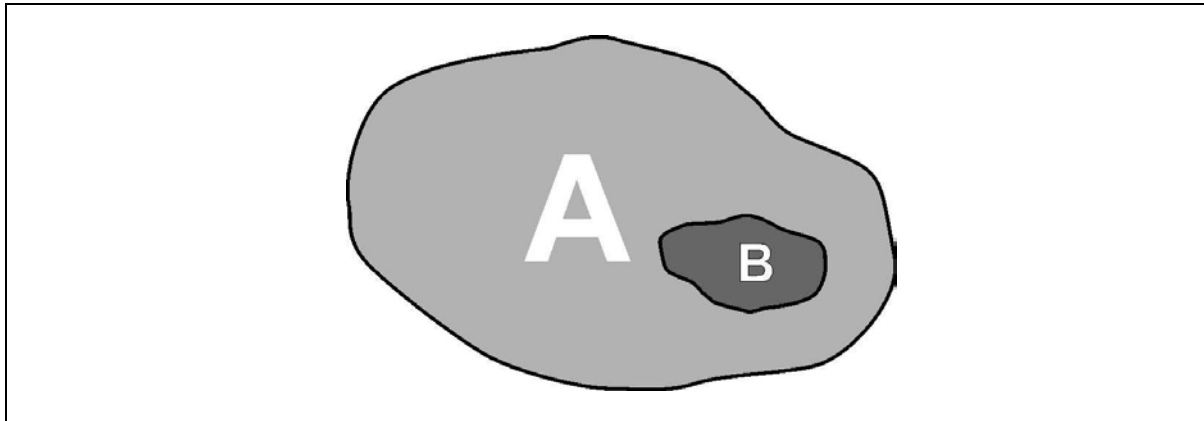


Abbildung 33: Verhältnis der Datenmenge A zur Datenmenge B

Bei ausschließlicher Betrachtung der Messwerte, für die Geschwindigkeitsangaben vorhanden sind (Menge G_B), waren die gebildeten klassenspezifischen Kalibrierlinien f_{40} , f_{60} , f_{80} als nicht repräsentativ gewertet worden und wurden deshalb verworfen. Die geschwindigkeitsspezifischen Datenmengen G_{40} , G_{60} und G_{80} könnten stattdessen zu einer Gesamtmenge (Menge B) vereinheitlicht werden. Diese Gesamtmenge wird jedoch, wie die betrachteten geschwindigkeitsspezifischen Mengen G_{40} , G_{60} und G_{80} , nicht repräsentativ sein, so dass die Ermittlung ihrer Kalibrierlinienparametern G_B nicht sinnvoll erscheint.

Mit einer paritätischen Datenbetrachtung (Menge C mit G_{40p} , G_{60p} und G_{80p}) wird eine Teilmenge zu den Messwerten mit Geschwindigkeitsangaben gebildet. Die Menge C umfasst dabei weniger oder höchstens genauso viele Elemente wie die Menge B und wird deshalb ebenfalls als nicht repräsentativ eingestuft.

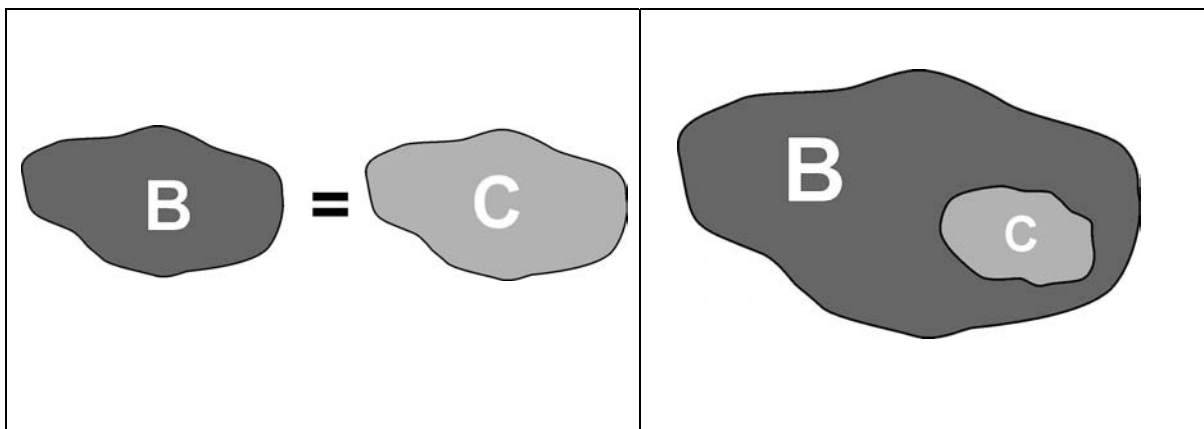


Abbildung 34: Mögliche Konstellationen der Datenmenge B zur Datenmenge C

Die Betrachtung aller verfügbaren Messwerte (Menge A mit G_A) birgt die Gefahr einer nicht paritätischen Betrachtung der Messdaten, das heißt, in der Menge A könnten vermehrt Messwerte einer Geschwindigkeitsklasse vorhanden sein. Damit würde die Kalibrierlinie stärker von einer Geschwindigkeitsklasse geprägt sein.

Annahme: Für die weitere Betrachtung muss davon ausgegangen werden, dass die in der Menge A vorhandenen Messdaten repräsentativ für die im Netz verteilten Griffigkeiten und für alle Geschwindigkeiten sind $\{\Delta M\}$.

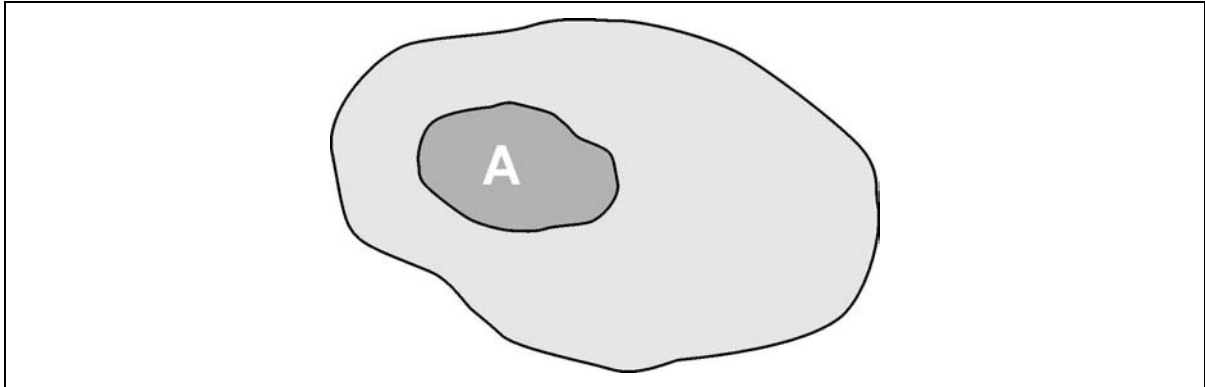


Abbildung 35: Menge aller verfügbaren Griffigkeitsmesswerte (Menge A) im Verhältnis zu den Griffigkeitsmesswerten im Netz

Schlussfolgerung: Für die im Folgenden allgemein formulierten Kalibrierlinien $f_{\text{prop.}}$ und f_{linear} sind dann jedoch größere Modellfehler zu erwarten. Außerdem sind die damit möglichen größeren Reststreuungen bei der Übertragung zu berücksichtigen. Die Ergebnisse sind in den Anlagen A13.1a und 13.2a enthalten. Sie dienen als Grundlage der weiteren Betrachtung.

3.5 Formulierung des Bewertungssystems GripTester

Mit der Analyse der Grundlagen des Bewertungssystems der SCRIM und der Entwicklung von Kalibrierlinien lassen sich die Anforderungswerte auf den GripTester transformieren. Die Transformation ist jedoch nur ein Teil bei der Formulierung des Bewertungssystems. Es zeigt sich, dass den beobachteten und implizierten Abweichungen bei den Werten der SCRIM und des GripTesters weitere Beachtung geschenkt werden muss. Die Abweichungen müssen in ihrer Größe erfasst werden. Dabei werden zunächst die prüfbedingten Abweichungen und die Modellfehler getrennt betrachtet und anschließend zusammengeführt.

Anschließend werden die zu berücksichtigenden Abweichungen in ihrer Wirkung auf die Transformation von Messwerten und Anforderungswerten diskutiert. Dabei wird eine Methode beschrieben um direkt Messwerte des GripTesters auf die SCRIM (und umgekehrt) umzurechnen. Diese Methode erlaubt die Bewertung des GripTester-Messwertes direkt mit dem Bewertungssystem SCRIM. Durch die Angabe eines Konfidenzintervalls können Fragestellungen der sicheren Unter- oder Überschreitung des Anforderungswertes beantwortet werden.

In einer anderen Methode werden die Anforderungswerte für das Bewertungssystem GripTester formuliert. Die Formulierung erfolgt so, dass mit Überschreiten der Anforderung mit dem GripTester-Messwert eine nahezu sichere Überschreitung der Anforderung mit dem SCRIM-Messwert möglich ist.

3.5.1 Allgemeine Anforderungen an das Bewertungssystem GripTester

Das Bewertungssystem für die Griffigkeit mit der SCRIM nutzt die Verteilung der Griffigkeit im deutschen Straßennetz. Die Verteilung ist in Abhängigkeit der Geschwindigkeit in einem Bewertungshintergrund enthalten. Ein Messwert wird in seiner Relation zu den Griffigkeiten der übrigen Straßenoberflächen bewertet. Danach erfüllt ein Straßenabschnitt bestimmte Anforderungen, wenn sein Messwert bestimmte Grenz- bzw. Anforderungswerte überschreitet. Die Anforderungswerte wurden unter Vorgabe bestimmter Schlechtanteile p ermittelt. Für die Anwendung unterschiedlicher Verfahren der Griffigkeitsmessungen sind Fälle unterschiedlicher Beurteilung jedoch nicht erwünscht. Demzufolge ist bei der Übertragung von Anforderungswerten wünschenswert, die Anforderungswerte so festzulegen, dass unterschiedliche Beurteilungen weitgehend vermieden werden können oder nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit eintreten. Bei der Formulierung des Bewertungssystems GripTester müssen deshalb die konkreten Messwertabweichungen von der Kalibrierlinie (die prüftechnischer Natur sind, aber auch den Modellfehler implizieren) berücksichtigt werden.

Folgende Zielstellung an das zu definierende Bewertungssystem GripTester wird zunächst formuliert:

- | |
|---|
| <ol style="list-style-type: none">1. Mit dem Bewertungssystem GripTester soll die gleiche Anzahl an Strecken als „schlecht“ und „gut“ bewertet werden, wie mit dem Bewertungssystem SCRIM.2. Mit dem Bewertungssystem GripTester sollen die gleichen Strecken als „schlecht“ und „gut“ bewertet werden, wie mit dem Bewertungssystem SCRIM. |
|---|

Mit Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile wurde die Zielstellung 1 des Bewertungssystems erreicht. Die Quantilwerte für das Prüfverfahren GripTester wurden so formuliert, dass sie im Bezug auf die Griffigkeitsverteilung der SCRIM im Netz die gleiche Anzahl an Strecken als „gut“ bzw. „schlecht“ bewerteten.

Bewertung und Formulierung weiterer Anforderungen an der BWH GripTester

Eine wesentliche Voraussetzung des Bewertungssystems ist erreicht, wenn z.B. von 100 Abschnitten durch das SCRIM-Verfahren 15 Messstrecken mit „schlecht“ beurteilt wurden und der GripTester auch 15 Messstrecken mit „schlecht“ beurteilt.

Diese Voraussetzung für eine adäquate Formulierung des Bewertungssystems ist notwendig, aber nicht hinreichend. Die Bewertungssysteme sind aber erst dann äquivalent, wenn **nicht nur** die gleiche Streckenanzahl, sondern auch die **gleichen Abschnitte** identifiziert werden. Die Anforderung an das Bewertungssystem des GripTesters lautet deshalb:

→ **Die Prüfverfahren müssen alle Strecken gleich beurteilen.**

3.5.2 Überprüfung auf Gleichheit in der Beurteilung von Messobjekten durch beide Prüfverfahren

Werden die Forderungen auf Gleichheit in der Beurteilung betrachtet, dann bedeutet dies Folgendes für beide Prüfverfahren: Wenn der wahre Wert ξ_1 eines Messobjektes kleiner ist als ein vorgegebener Quantilwert Q_x , dann muss ebenfalls der wahre Wert η_1 dieses Messobjektes kleiner sein als der zugehörige Quantilwert Q_y . Analog dazu muss für einen wahren Wert ξ_2 , der größer ist als der Quantilwert Q_x , der wahre Wert η_2 auch größer sein als der zugehörige Wert Q_y .

$$\xi_1 < Q_x \quad \eta_1 < Q_y \quad \text{und} \quad Q_x < \xi_2 \quad Q_y < \eta_2$$

Daraus folgt die Relation zwischen den wahren Werten ξ_1 und ξ_2 sowie η_1 und η_2 .

$$\xi_1 < \xi_2 \quad \eta_1 < \eta_2 .$$

Da die Werte ξ_1 , ξ_2 , η_1 und η_2 beliebig sein können, besteht die Forderung auf Erhaltung der Relationen zwischen den Messobjekten:

Wird der durch das Prüfverfahren SCRIM repräsentierte wahre Wert eines Messabschnittes A kleiner bewertet als der wahre Wert des Messabschnittes B, dann muss das Prüfverfahren GripTester den Messabschnitt A ebenfalls kleiner bewerten als den Messabschnitt B.

Zur Überprüfung dieser Forderung stehen die simultan durchgeführten Messungen mit den gebildeten Messwertpaaren (x_i, y_i) zur Verfügung. Wesentlicher Nachteil ist dabei, dass diese Messwertpaare nur eine Näherung an die Paare der wahren Werte (ξ_i, η_i) darstellen.

Entsprechend den Relationen der Messwerte x wurde den Messwerten x_i aus der Menge aller Messwerte ein Rang r_j und den Messwerten y_i ein Rang p_k (j und $k \in \mathbb{N}$) zugeordnet. Danach wurden die Rangpaare (r_j, p_k) gebildet und in ein kartesisches Koordinatensystem eingetragen.

Werden die Relationen von beiden Prüfverfahren gleich wiedergegeben, dann müssten sich die Punkte durch eine monotone Funktion darstellen lassen. Das Ergebnis der Zusammenstellung ist in Abbildung 36 dargestellt.

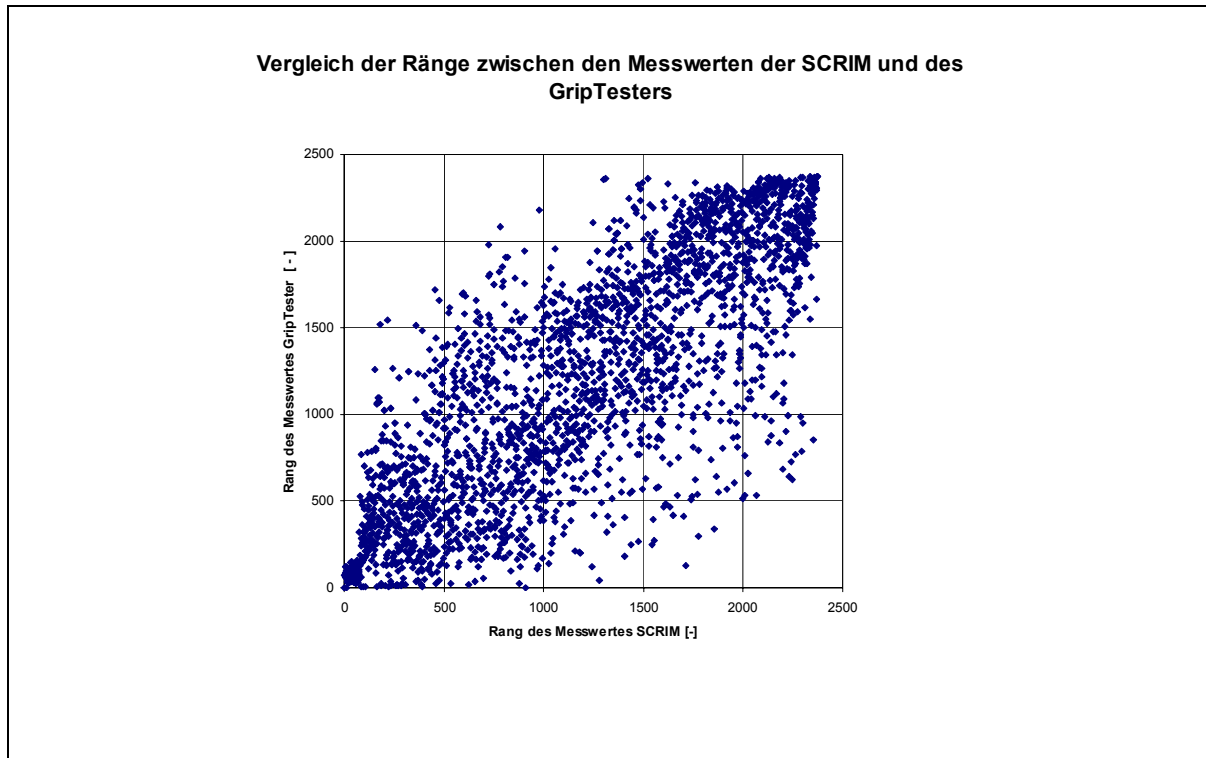


Abbildung 36: Gegenüberstellung der Messwertränge zwischen GripTester und SCRIM

In Abbildung 36 zeigen sich die Rangpunkte als Punktwolke um die Gerade mit dem Anstieg $m = 1$. Beide Prüfverfahren geben offensichtlich die Relationen bei Messabschnitten mit sehr geringer und mit sehr hoher Griffigkeit gleichermaßen wieder. Es besteht aber keine monotone Funktion als Zusammenhang.

Im betrachtbaren Einzelfall eines Griffigkeitswertes sind große Abweichungen in den Rangzahlen zu beobachten. Anhand dieser Beobachtung an den Messwerten muss damit die Hypothese auf Erhaltung der Relation abgewiesen werden. Die beobachteten Abweichungen von der Geraden mit $m = 1$ haben ihre Ursache in den prüfbedingten Abweichungen und den tatsächlichen Unterschieden bei der Beurteilung der Messobjekte (Modellfehler) durch die beiden Prüfverfahren. Das Fehlen einer monotonen Zusammenhangsfunktion in den Rängen zeigt, dass die Identifizierung einer Strecke mit einer gleich lautenden Beurteilung über beide Verfahren nicht möglich sein wird. Die Einhaltung der Relationsforderung zwischen zwei Strecken, dass aus $\xi_1 < \xi_2$ immer $\eta_1 < \eta_2$ folgt, ist damit gestört.

3.5.3 Spezifische Forderungen an das Bewertungssystem GripTester

Die Rangbetrachtung hat gezeigt, dass zwischen den konkreten Messwerten von SCRIM und GripTester Abweichungen existieren, die ihre Ursache in verfahrensbedingten Unterschieden und in den prüfbedingten Abweichungen haben. Diese Abweichungen werden in den anschließenden Abschnitten bestimmt.

Die Abweichungen scheinen nicht ‚gerichtet‘ zu sein.

Ausgangspunkt dieser Arbeit war jedoch der Bewertungshintergrund SCRIM und seine bereits festgelegten Anforderungswerte. Da diese determiniert sind, werden die Abweichungen zunächst nur im Bewertungssystem GripTester berücksichtigt.

Die weiteren Betrachtungen gehen in zwei Richtungen:

- (1) Formulierung von Funktionen, die eine Messwerttransformation von GripTester → SCRIM ermöglichen. Die Modellfehler werden dabei jeweils im angegebenen Konfidenzintervall berücksichtigt.
- (2) Formulierung der Anforderungswerte GripTester für eine Abnahmesituation bei einer sicheren Überschreitung der Anforderungswerte SCRIM.

Mit den Ergebnissen aus (1) können Messwerte des GripTesters in adäquate SCRIM-Werte übertragen werden. Mit dem Konfidenzintervall werden Grenzen formuliert, die durch den wahren Wert der SCRIM nur mit geringer Wahrscheinlichkeit unter- bzw. überschritten werden. Vergleichsszenarien folgender Natur können damit beschrieben werden:

- A** – Es liegt ein Grenzwert für SCRIM vor; mit der oberen Grenze des Konfidenzintervalls wird dieser Grenzwert sicher unterschritten.
- B** – Es liegt ein Grenzwert für SCRIM vor; mit der unteren Grenze des Konfidenzintervalls wird dieser Grenzwert sicher überschritten.

Mit den Ergebnissen aus (2) können Messwerte des GripTesters direkt mit Anforderungswerten GripTester verglichen werden. Die Anforderungswerte werden so formuliert, dass sie der Kontrollsituation entsprechen. Die Überschreitung eines Anforderungswertes GripTester führt zu einer nahezu sicheren Überschreitung der SCRIM-Anforderungen.

3.5.4 Formulierung der Umrechnung GripTester → SCRIM

Die wahren Werte ξ_i des Prüfmerkmals X werden durch die Messwerte x_i und die wahren Werte η_i des Prüfmerkmals Y durch y_i repräsentiert.

Angenommen es existiert zwischen den wahren Werten ein linearer Zusammenhang, dann gilt für diesen:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 \xi. \quad 3.5-1$$

Dabei sind β_0 und β_1 die Parameter der Modellgeraden, die aber nicht bekannt sind und nur aus Stichproben geschätzt werden können. Als Schätzungen werden die Werte b_0 und b_1 angegeben. Die Parameter b_0 und b_1 sind die Parameter der Regressionsgeraden für die Stichprobe. Mit dem Modell eines linearen Zusammenhangs zwischen den Prüfmerkmalen wird für die konkreten Messergebnisse die Messunsicherheit U in der Gleichung 3.5-1 berücksichtigt. Der Modellansatz lautet danach

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X + U \quad 3.5-2$$

bzw. für die Regressionsgerade der Stichprobe

$$Y = b_0 + b_1 X. \quad 3.5-3$$

Die Regressionsgerade weicht mehr oder weniger stark von der tatsächlichen Modellgeraden ab. Werden die Messungen beider Prüfmerkmale simultan durchgeführt, entsteht ein Ergebnispaar (x_i, y_i) , das in der Regel nicht auf der Modellgeraden liegen wird. Die Punkte streuen um die Modellgerade, so dass zu jedem x_i ein y_i^* nach Gleichung 3.5-4 gehört. In der Regel gilt $y_i \neq y_i^*$:

$$y_i^* = b_0 + b_1 x_i. \quad 3.5-4$$

Der Wert y_i^* stellt damit eine Schätzung für den Wert y_i dar. Von besonderem Interesse ist nun, wie genau der Wert y_i^* den Wert y_i repräsentiert. Zu dem beobachteten Wert x_i wird über die Regressionsgerade ein mittlerer Wert y_i^* für das Prüfmerkmal Y ermittelt. Der mittlere Wert y_i^* ist eine Schätzung für y_i . Die Genauigkeit dieser Schätzung bestimmt die Größe des Vorhersagebereichs. Im Vorhersagebereich werden die prüfbedingten Abweichungen U und die Unsicherheit der Regressionsgeraden berücksichtigt. Nach GRAF, HENNING, STANGE 1968 ermittelt sich der Vorhersagebereich nach

$$\begin{aligned} (b_0 + b_1 x_i) - t_{\frac{1+s}{2}; n-2} s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{L_x}} &\leq b_0 + b_1 x_i \\ b_0 + b_1 x_i &\leq (b_0 + b_1 x_i) + t_{\frac{1+s}{2}; n-2} s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{L_x}} \end{aligned} \quad 3.5-5$$

Der Vorhersagebereich ist ein Bereich, in dem auf Basis der empirisch ermittelten Ausgleichsgeraden $y=b_0+b_1x$ ein zur Stelle x zukünftig zu ermittelnder Wert $y(x)$ mit vorgegebener statistischer Sicherheit $1-\alpha$ zu erwarten ist.

	Reststreuung zur Regressionsgeraden
Standardabweichung der Abweichungen von der Regressionsgeraden bei Ableserichtung $X \rightarrow Y$	0,1032
Standardabweichung der Abweichungen von der Regressionsgeraden bei Ableserichtung $Y \rightarrow X$	0,0703

Tabelle 17: Streuung der Abweichungen zur Regressionsgeraden in Abhängigkeit von der Ableserichtung

Die Größe des Vorhersagebereichs wird bestimmt von der gewählten statistischen Sicherheit α . Der Vorhersagebereich beantwortet die **zweiseitige Fragestellung**.

Für die Übertragung von Griffigkeitswerten und den anschließenden Vergleich mit einer Grenze ist jedoch wesentlich interessanter, ob ein bestimmter Wert mit einer Sicherheit α überschritten werden kann. Dies führt zu einer **einseitigen Fragestellung**. Die einseitige Fragestellung wird mit Hilfe der Formel

$$(b_0 + b_1 x_i) - t_{n-2; 1-\alpha} s \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x_i - \bar{x})^2}{L_x}} \leq b_0 + b_1 x_i \quad 3.5-6$$

beantwortet.

Umsetzung der Übertragung an einem Beispiel

Die ermittelten Vorhersagebereiche werden im konkreten Anwendungsfall angewendet. Für den Zusammenhang zwischen dem Prüfmerkmal X (SCRIM-Wert) und dem Prüfmerkmal Y (GripTester-Wert) wird aus den empirischen Untersuchungen der Regressionsansatz gewonnen. Er lautet:

$$y_{GT} = 1,0663x_{SC} - 0,0247. \quad 3.5-7$$

Der Umfang verwendeter Messdaten beträgt $n = 5076$. Dazu wurde der Wert L_x zu 67,15 ermittelt. Mit diesen Werten wird die Gleichung 3.5-7 betrachtet. Der Mittelwert beträgt 0,521.

$$1 + \frac{1}{5076} + \frac{(x_i - 0,521)^2}{67,15} \quad 3.5-8$$

Für die Betrachtung wird ein x_i von 0,25 angenommen. Damit wurde ein Messwert gewählt, der sehr niedrig ist und damit als Extremwert gesehen werden kann. Damit wird 3.5-10 zu

$$1 + 0,0002 + 0,001 = 1,0012 \approx 1.$$

Die Unsicherheit des übertragenen Wertes wird folglich weitgehend bestimmt aus der Messunsicherheit des Messergebnisses und seiner Streuung s.

Der die Unsicherheit der Regressionsgeraden berücksichtigende Term ist sehr klein. Im praktischen Sinne kann damit der Einfluss aus der Unsicherheit der Regressionsgeraden vernachlässigt werden.

Umkehrung: Ablesung eines SCRIM-Wertes aus einem GripTester-Wert

Nach dem Austausch der Prüfmerkmale auf den Achsen wird die Regressionsgerade neu ermittelt. Für den ermittelten Zusammenhang zwischen dem Prüfmerkmal X (GripTester-Wert) und dem Prüfmerkmal Y (SCRIM-Wert) wird der Regressionsansatz aus den empirischen Untersuchungen angewendet. Für den Schluss von einem GripTester-Wert auf einen SCRIM-Wert lautet die Regressionsgerade:

$$y_{sc} = 1,7033x_{GT} - 0,3563. \quad 3.5-9$$

Die Gleichungen 3.5-5 und 3.5-7 behalten ihre Gültigkeit, wobei jeweils die entsprechenden Werte für Mittelwert und Standardabweichung des GripTesters einzusetzen sind. Der zu berücksichtigende Korrekturwert für die prüfbedingten Abweichungen wird entsprechend Gleichung 3.5-7 berechnet.

3.5.5 Formulierung der Anforderungswerte für den GripTester, Betrachtung der Abweichungen

(1) Bestimmung der Streuung und Berücksichtigung des Modellfehlers zur gewählten Kalibrierlinie

Mit Festlegung eines linearen Zusammenhangs (Modellzusammenhang) für die Kalibrierlinie wird der technische Zusammenhang zwischen den Prüfgrößen der SCRIM und des GripTesters nur unvollständig wiedergegeben. Damit wurde ein Modellfehler impliziert. Dieser Modellfehler ist als Abweichung zwischen den Punkten (ξ_i, η_i) (*wären diese vorhanden*) und der Kalibrierlinie zu erkennen.

Da das Prüfverfahren SCRIM als primäres Verfahren vereinbart ist, muss der durch den Modellansatz eingeführte Modellfehler der SCRIM beim Prüfmerkmal des GripTesters

berücksichtigt werden. Der beobachtete Gesamtfehler ω_i zwischen dem Punkt (x_i, y_i) und der Kalibrierlinie setzt sich, wie bereits bekannt, aus dem Prüffehler w_i und dem Modellfehler ε_i zusammen.

Für die Bestimmung der Streuung des Modellfehlers σ_ε wird angenommen, dass die prüfbedingten Abweichungen w und die Modellfehler ε normal verteilt und unabhängig voneinander sind ($\rho_{we} = 0$). Unter diesen Voraussetzungen setzt sich die Streuung der zur Kalibrierlinie beobachteten Abweichungen zusammen aus

$$\sigma_\omega^2 = \sigma_w^2 + \sigma_\varepsilon^2. \quad 3.5-10$$

Die Gleichung wird nach σ_ε^2 aufgelöst und man erhält

$$\sigma_\varepsilon^2 = \sigma_\omega^2 - \sigma_w^2. \quad 3.5-11$$

Für die Bestimmung der Streuung des Gesamtfehlers wird die Standardabweichung über die Abweichungen w gebildet. Die Punkte der wahren Werte (ξ_i, η_i) werden in der Regel wegen des Fehlers $\varepsilon_i \neq 0$ nicht auf der Kalibrierlinie liegen. Da die wahren Werte nicht bekannt sind, werden im Modell die Punkte $(\xi_i, \lambda_i = \alpha + \beta \xi_i)$ als richtige Werte angenommen. Die Werte x_i werden in die Punkte $(x_i, \lambda_i = \alpha + \beta x_i)$ eingesetzt. Die beobachtete Abweichung $\omega_i = y_i - \lambda_i$ setzt sich zusammen aus prüfbedingten Abweichungen w_i und Modellabweichungen ε_i zu $\omega_i = w_i + \varepsilon_i$. Die Standardabweichung der prüfbedingten Abweichungen σ_w wird mit den Werten aus Präzisionsuntersuchungen abgeschätzt. Dabei wird die Standardabweichung unter Vergleichsbedingungen verwendet. Laut Voraussetzung werden die auftretenden Abweichungen dem Prüfverfahren GripTester „zuschrieben“. Die Messfehler des Prüfmerkmals X (SCRIM-Werte) sind deshalb mit dem Wert Null angenommen. Für die prüfbedingten Streuungen wird die Standardabweichung für Messungen mit dem GripTester eingesetzt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 dargestellt.

	alle Messgeschwindigkeiten
Standardabweichung der prüfbedingten Streuung unter Vergleichsbedingungen σ_R (GripTesters)	0,020
Standardabweichung der beobachteten Abweichung zur Kalibrierlinie σ_ω	0,103
Standardabweichung des Modellfehlers σ_ε	0,101

Tabelle 18: Ermittlung der Streuung des Modellfehlers σ_ε

Die Übersicht zeigt eine relativ große Streuung des Modellfehlers.

Schlussfolgerungen aus den Modellfehlern

Offensichtlich ist der Modellfehler im Vergleich zu den prüfbedingten Streuungen nicht gering. Der Modellfehler hat Einfluss auf die Genauigkeit eines transformierten Anforderungswertes. Je größer der Modellfehler ist, desto unsicherer ist der Zahlenwert des Anforderungswertes. Die übertragenen Anforderungswerte werden entsprechend mit einer Unsicherheit angegeben. Im Hinblick auf die Praktikabilität des zu entwickelnden Bewertungshintergrundes sind die Anforderungswerte als Zahlenwerte ohne Vertrauensbereich anzugeben.

Der Anforderungswert ist deshalb so zu formulieren, dass er die Modellfehler bereits berücksichtigt. Daraus folgt eine Neuformulierung der Forderungen an den Bewertungshintergrund:

Die Anforderungen Q_y im Bewertungssystem GripTester sind so zu formulieren, dass aus der Überschreitung einer Grenze Q_y durch den wahren Wert η des Prüfmerkmals Y die Überschreitung von ξ zu einer Grenze Q_x folgt. Die Werte Q_x und Q_y sind dabei korrespondierende Anforderungswerte vergleichbarer Qualität.

Mit anderen Worten: Die Grenzwerte für das Bewertungssystem des GripTesters sollen so formuliert werden, dass die Einhaltung eines bestimmten Qualitätsmerkmals mit hoher Wahrscheinlichkeit zur Einhaltung des Qualitätsmerkmals bei Beurteilung mit der SCRIM geführt hätte. Unter Berücksichtigung des Modellfehlers wird entsprechend die Anforderung Q_y auf Q_y' erhöht:

$$Q_y' = Q_y + a. \quad 3.5-12$$

Der Wert a ist ein Sicherheitszuschlag. Unter der Annahme normalverteilter Modellfehlerabweichungen ε_i wird für $P = 95 \%$ der Wert a festgelegt auf:

$$a = 1,65 * \sigma_\varepsilon. \quad 3.5-13$$

Unter Berücksichtigung der Modellfehlerstreuung ergibt sich folgender Sicherheitszuschlag:

	alle Messgeschwindigkeiten
Standardabweichung des Modellfehlers σ_ε	0,101
Sicherheitszuschlag	0,167

Tabelle 19: Sicherheitszuschlag infolge des Modellfehlers

Die Veränderung der Quantilwerte Q_y führt, unter Berücksichtigung der Verteilungen des Bewertungshintergrundes GripTester, zu veränderten Schlechtanteilen p_y' des GT. Mit

$Q_y < Q_y'$ folgt für die Schlechtanteile $p_y < p_y'$. Damit folgt aber für den Vergleich der Schlechtanteile zum Quantilwert Q_x : $p_x < p_y'$.

Die Berücksichtigung der Modellfehler als Sicherheitszuschlag konkurriert somit mit der Zielstellung, bei der Übertragung der Anforderungswerte gleiche Schlechtanteile nach Verfahren A vorauszusetzen. Wenn diese Zielsetzung aufgegeben werden muss, dann ist die Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile auch nach Verfahren B gleichberechtigt.

Das Bewertungssystem für den GripTester wird somit nunmehr unter Berücksichtigung der Sicherheitszuschläge entwickelt. Am anschließenden Vergleich der Anforderungswerte nach Verfahren A und Verfahren B werden die endgültigen Anforderungswerte festgelegt.

(2) Bestimmung der Streuung und Berücksichtigung der prüfbedingten Abweichungen

Zur Beurteilung der Qualität eines Prüfmerkmals über Messungen werden Prüfpläne entwickelt. Sie dienen dem Vergleich der Messergebnisse mit den Anforderungswerten. Dazu werden in den Messungen Stichproben vom Umfang n gezogen. Weiterhin wird festgelegt, welcher Schlechtanteil p für die Stichprobe als maximal zulässig angenommen wird. Auf das Prüfmerkmal X bezogen sind das die Parameter n_x und $p_{x, \max}$. Diese beiden Parameter bilden den so genannten (n_x, k_x) Prüfplan. Die Variable k_x ist dabei der Annahmefaktor. Mit dem Prüfplan wird die Anforderung an das Messergebnis formuliert.

Die Quantilenforderung auf Einhaltung eines Mindestquantilwertes $Q_{x, \min}$ gilt, wenn

$$\bar{x} - k_x s_x \geq Q_{x, \min} . \quad 3.5-14$$

Dabei gilt:

$$\bar{x} = \sum \frac{x_i}{n_x} \quad 3.5-15$$

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n_x - 1)}} . \quad 3.5-16$$

Für das Prüfverfahren SCRIM werden zwei zueinander statistisch verträgliche 100 m-Einzelwerte durch arithmetische Mittelwertbildung zu einem Messergebnis zusammengefasst (ARS 24/ 2003). Der sich auf das Messergebnis beziehende Stichprobenumfang beträgt in der Regel $n_x = 1$. Durch die geringe Anzahl an Ergebnissen kann die Stichprobenstreuung s_x nicht ermittelt werden. Für den Wert s_x wird deshalb die Standardabweichung unter Vergleichbedingungen $\sigma_{R,x}$ eingesetzt. Die Gleichung 3.5-16 wird danach zu

$$\bar{x} - k_x \sigma_{R;x} \geq Q_{x;\min} . \quad 3.5-17$$

Die Größe des Annahmefaktors k_x richtet sich nach dem zu vereinbarenden, maximal zulässigen Schlechtanteil $p_{x,\max}$. Für das Prüfverfahren SCRIM wird ein maximal zulässiger Schlechtanteil von 5 % angenommen. Der Annahmefaktor k_x beträgt damit 1,65.

Für das Prüfmerkmal Y wird die Forderung auf Einhaltung eines Mindestquantilwertes $Q_{y,\min}$ analog formuliert. Somit wird ebenfalls ein Prüfplan (n_y, k_y) definiert. Die Quantilenforderung für das Merkmal Y gilt als eingehalten, wenn

$$\bar{y} - k_y s_y \geq Q_{y;\min} . \quad 3.5-18$$

Auch beim Prüfmerkmal Y wird die Stichprobengröße in der Regel nicht größer sein als 1. Für die Streuung der Stichprobe s_y wird jedoch, neben der Streuung unter Vergleichbedingungen, auch die Streuung der Modellfehler berücksichtigt werden. Der Wert s_y wird ersetzt durch die Standardabweichung unter Vergleichbedingungen $\sigma_{R,y}$.

Die Quantilenforderung für das Merkmal Y wird dann formuliert als

$$\bar{y} - k_y \sigma_{R;y} \geq Q_{y;\min} . \quad 3.5-19$$

Aus Annahmefaktor und Standardabweichung wird ein Differenzmaß $k \cdot \sigma_R$ gebildet. Um einen Grenzwert $Q_{x,\min}$ mit der angegebenen Wahrscheinlichkeit zu überschreiten, muss der aus den empirischen Messungen ermittelte Mittelwert den Grenzwert um das Differenzmaß übersteigen. Die Forderung für die Einhaltung des Grenzwertes aus Gleichung 3.4-1 lautet damit

$$\bar{x} \geq Q_{x;\min} + k_x \sigma_{R;x} . \quad 3.5-20$$

Wird für jede Prüfung die gleiche Wahrscheinlichkeit P und eine konstante Standardabweichung σ_R vorausgesetzt, so lässt sich ein transformiertes Bewertungssystem für den GripTester entwickeln.

Mit

$$a = k_x \sigma_{R;x} \quad 3.5-21$$

wird Gleichung 3.5-20 zu

$$\bar{x} \geq Q_{x;\min} + a \quad 3.5-22$$

und weiter

$$\bar{x} \geq Q_{x;\min} + a = Q'_{x;\min} \quad 3.5-23$$

$$\bar{x} \geq Q'_{x;\min} . \quad 3.5-24$$

Die Werte $Q'_{x;\min}$ sind damit die Anforderungswerte des neuen Bewertungssystems.

Zur Veranschaulichung dieses Vorgehens wird folgende Erklärung gegeben: Der betrachtete Messabschnitt besitzt einen Kraftschlussbeiwert, der durch das Merkmal Griffigkeit repräsentiert wird. Der wahre unbekannte Wert der Griffigkeit ist ξ . Da der wahre Wert nicht bestimmt werden kann, wird dieser Wert durch den Erwartungswert $E(\bar{x})$ ersetzt (richtiger Wert). Der Mittelwert \bar{x} ist ein nach den technischen Prüfvorschriften ermitteltes Messergebnis. Das Messergebnis und damit der Mittelwert ist eine zufällige Größe, die um ihren Erwartungswert mit σ streut. Dadurch sind die Messergebnisse gleich oder kleiner (2), (3) oder größer (1) als der Erwartungswert, siehe Abbildung 37.

Es ist festzustellen, dass alle Messergebnisse Elemente der Grundgesamtheit von Werten sind, die der Normalverteilung folgen und mit σ um den Erwartungswert streuen. Soll der Erwartungswert eines Messabschnittes $E(\bar{x})$ einen bestimmten Anforderungswert $Q_{x, \min}$ überschreiten, dann gilt die Forderung

$$E(\bar{x}) \geq Q_{x, \min}.$$

Diese Forderung ist offensichtlich auch dann erfüllt, wenn Elemente \bar{x} (die auch zufällig sind) der Grundgesamtheit kleiner als der Anforderungswert $Q_{x, \min}$ sind. Mittelwerte \bar{x} , die nicht erheblich kleiner sind als der Anforderungswert, entstammen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit der Grundgesamtheit mit dem Erwartungswert $E(\bar{x})$, für den die Anforderung gerade noch erfüllt sein kann.

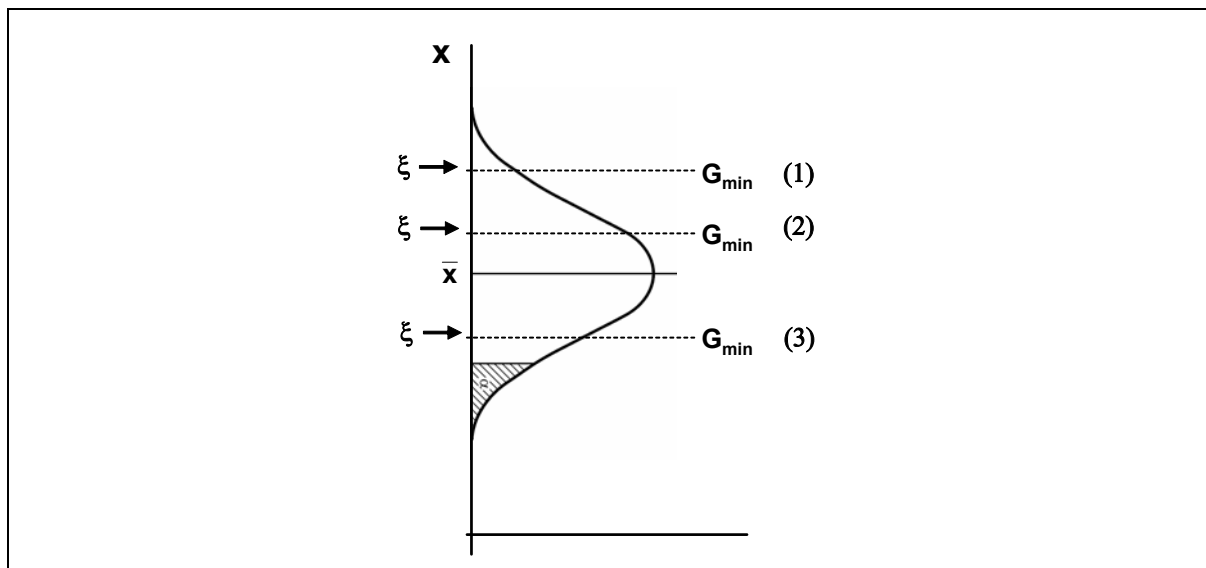


Abbildung 37: Relation zwischen Anforderungsgrenze, wahren Wert und Messergebnis im Fall der ‚gerade noch‘ Erfüllung

Aus der Relation zwischen Erwartungswert und Anforderungswert lässt sich also nicht auf die Erfüllung der Anforderung schließen. Soll eine Anforderung „sicher“ erfüllt sein, so muss der Anforderungswert deutlich, siehe (1), überschritten werden. Soll der Erwartungswert einer

Stichprobe den Anforderungswert „sicher“ übersteigen, dann muss das Messergebnis einen entsprechend höheren Anforderungswert überschreiten.

(3) Berücksichtigung von Modellfehler und prüfbedingter Abweichung

Mit Formulierung von Anforderungswerten für den GripTester wurde eine Möglichkeit zur Beurteilung von Griffigkeitsmessergebnissen geschaffen. Soll aus dem Messergebnis \bar{x} und nicht aus den unbekannten wahren Werten ξ eine Aussage auf Erfüllung der Anforderung getroffen werden, dann sind die prüfbedingten Abweichungen durch Erhöhung der Anforderungen zu berücksichtigen. Grund dafür ist die zu erwartende Differenz zwischen dem Messergebnis \bar{x} und dem Erwartungswert $E(\bar{x})$.

Es ist festzustellen, dass dabei nicht nur die Modellfehler, sondern auch die prüfbedingten Abweichungen bei den Anforderungswerten zu beachten sind. Diesen beiden Fehlerarten können mit zwei verschiedenen Strategien berücksichtigt werden:

1. Prüfbedingte Abweichungen und Modellfehler werden getrennt betrachtet und jeweils durch einen eigenen Sicherheitszuschlag berücksichtigt.
2. Prüfbedingte Abweichungen und Modellfehler werden gemeinsam betrachtet und in einem gemeinsamen Sicherheitszuschlag berücksichtigt.

Die getrennte Betrachtung hat den Vorteil, dass Veränderungen im Prüfplan, z.B. durch Veränderungen der Prüfpräzision oder der angenommenen Irrtumswahrscheinlichkeit, einfacher im Bewertungssystem umgesetzt werden können. Dies führt jedoch in der Summe zu größeren Sicherheitszuschlägen.

Getrennte Betrachtung der Abweichungen

Der Sicherheitszuschlag für den Modellfehler wurde mit 0,17 berechnet. Die prüfbedingten Abweichungen werden entsprechend den Gleichungen 3.5-14 berücksichtigt. Für die Streuung der prüfbedingten Abweichungen $\sigma_{R,x}$ wird der Zahlenwert für die Standardabweichung unter Vergleichbedingungen des GripTesters eingesetzt. Der Annahmefaktor k_y wird mit 1,65 angesetzt. Nach Gleichung 3.5-15 ergibt sich danach

$$a = k_y \sigma_{R,y} = 1,65 * 0,020 \approx 0,03.$$

Die Sicherheitszuschläge des Modellfehlers in Höhe von 0,17 und der prüfbedingten Abweichungen in Höhe von 0,03 ergeben einen Gesamtsicherheitszuschlag von 0,20.

Gemeinsame Betrachtung der Abweichungen

Bei gemeinsamer Betrachtung des Modellfehlers und der prüfbedingten Abweichungen wird davon ausgegangen, dass beide Einflussgrößen unabhängig auf das Prüfmerkmal Y einwirken und beide Fehler unabhängig voneinander wirken. Die resultierende Gesamtstreuung σ_G wird aus der Streuung des Modellfehlers σ_ϵ und der prüfbedingten Streuung abgeschätzt:

$$\sigma_G^2 = \sigma_M^2 + \sigma_R^2 \quad 3.5-25$$

Es folgt

$$\sigma_G = \sqrt{\sigma_M^2 + \sigma_R^2} \quad 3.5-26$$

Die prüfbedingten Streuungen betragen $\sigma_{R,y} = 0,020$. Der Modellfehler ist angegeben durch $\sigma_M = 0,101$. Die Streuung des Gesamtfehlers wird damit zu

$$\begin{aligned} \sigma_G &= \sqrt{(0,101)^2 + (0,020)^2} \\ \sigma_G &= 0,103. \end{aligned}$$

Wird der Annahmefaktor k_y wiederum mit 1,65 angesetzt, ergibt sich nach Gleichung 3.5-15:

$$a = k_y \sigma_G = 1,65 * 0,103 = 0,170.$$

Es ist erkennbar, dass die Unterschiede zwischen den Betrachtungsweisen zu verschiedenen großen Sicherheitszuschlägen führen.

3.5.6 Festlegung der Anforderungswerte an das Bewertungssystem GripTester

Die Anforderungswerte wurden mit Kalibrierlinien übertragen. Die Ergebnisse dieser Übertragung stammen aus Anlage A13.1a und A13.2a dargestellt. Entsprechend den obigen Anmerkungen zu den Anforderungen an das Bewertungssystem GripTester, werden die Ergebnisse um den Sicherheitszuschlag erhöht. Diese korrigierten Ergebnisse sind in den Anlagen A17.1a und A17.2a dargestellt. Durch die unterschiedlichen Berechnungsläufe entstehen unterschiedliche ‚Sätze‘ von Anforderungswerten.

Werden die Anforderungswerte der linearen Modellansätze nach Übertragung über Verfahren A (Bestimmung des Quantilwertes mit gleichem Schlechtanteil) mit Anforderungswerten über Verfahren B (direkte Übertragung des Quantilwertes mit Hilfe der Kalibrierlinie) verglichen, dann ergeben sich nur geringe Differenzen. Der direkte Vergleich

in Anlage A18 zeigt, dass die Anforderungswerte bei Übertragung nach Verfahren A in der Regel etwas höher sind als die Anforderungswerte nach Verfahren B.

Da das Bewertungssystem des GripTesters aus dem Bewertungssystem der SCRIM entwickelt wurde und das Überschreiten der Anforderungswerte des GripTesters durch ein Messergebnis zu einer nahezu sicheren Überschreitung der Anforderungswerte der SCRIM führen soll, werden jeweils die höheren Anforderungswerte nach Verfahren A für das Bewertungssystem GripTester festgelegt $\{\Delta M\}$, siehe **Tabelle 20**.

	Sollmessgeschwindigkeit		
Zustandswerte	40 km/h	60 km/h	80 km/h
1,0	0,90	0,83	0,76
1,5	0,86	0,79	0,71
2,0	0,81	0,73	0,66
3,0	0,71	0,64	0,57
3,5	0,67	0,60	0,53
4,0	0,62	0,55	0,47
4,5	0,57	0,51	0,43
5,0	0,53	0,45	0,38
Abnahme	0,77	0,69	0,62
Verjähung	0,71	0,65	0,58

Tabelle 20: Anforderungswerte im Bewertungssystem GripTester

3.5.7 Annahme- und Rückweisewahrscheinlichkeit des Bewertungssystems GripTester

Mit dem Bewertungssystem des GripTesters wurden Anforderungswerte formuliert, die mit denen der SCRIM korrespondieren. Dabei wurden die Anforderungswerte so formuliert, dass mit der Beurteilung ‚gut‘ des Abschnitts mit dem GripTester eine alternative Bewertung mit der SCRIM auch zur Beurteilung ‚gut‘ geführt hätte. Mit anderen Worten ist das Bewertungssystem so formuliert, dass eine positive Beurteilung mit dem GripTester mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls zu einer positiven Beurteilung mit der SCRIM führt. Daraus folgt aber nicht, dass die Beurteilung ‚nicht gut‘ bzw. ‚schlecht‘ mit dem GripTester zwangsläufig zur Beurteilung ‚schlecht‘ mit der SCRIM führt.

Um die Anforderungswerte des Bewertungssystems GripTester zu prüfen, wird an Abschnitten mit simultan durchgeführten Messungen mit SCRIM und GripTester die Einhaltung der Anforderungswerte überprüft. Zunächst werden alle dabei möglichen Beurteilungskombinationen beschrieben.

Wenn ein Abschnitt mit beiden Prüfverfahren überprüft wurde, dann liegen für diesen Abschnitt Messergebnisse für die SCRIM x_i und Messergebnisse für den GripTester y_i vor. Die Messergebnisse werden dann mit den Anforderungswerten des jeweiligen Bewertungssystems verglichen. Folgende Ereignisse A_x , A_y , R_x , R_y der Beurteilungen können dabei auftreten:

- A_x Das Messergebnis x_i ist größer bzw. gleich dem Anforderungswert, die Beurteilung ist ‚gut‘.
- A_y Das Messergebnis y_i ist größer bzw. gleich dem Anforderungswert, die Beurteilung ist ‚gut‘.
- R_x Das Messergebnis x_i ist kleiner als der Anforderungswert, die Beurteilung ist ‚schlecht‘.
- R_y Das Messergebnis y_i ist kleiner als der Anforderungswert, die Beurteilung ist ‚schlecht‘.

Da beide Prüfverfahren simultan eingesetzt wurden, können die Ereignisse für jeden Abschnitt in folgenden möglichen Ereigniskombinationen auftreten:

- $A_x A_y$ Beide Prüfverfahren kommen zu der Beurteilung ‚gut‘.
- $A_x R_y$ Das Prüfverfahren SCRIM kommt zur Beurteilung ‚gut‘, während das Prüfverfahren GripTester zur Beurteilung ‚schlecht‘ kommt.
- $A_y R_x$ Das Prüfverfahren GripTester kommt zur Beurteilung ‚gut‘, während das Prüfverfahren SCRIM zur Beurteilung ‚schlecht‘ kommt.
- $R_x R_y$ Beide Prüfverfahren kommen zur Beurteilung ‚schlecht‘.

Für die Ereigniskombinationen soll die Eintrittswahrscheinlichkeit empirisch ermittelt werden. Dazu wird die Klasseneinteilung unterschiedlicher Sollmessgeschwindigkeiten simultan durchgeführter Messungen mit den Ergebnissen (x_i, y_i) genutzt. Alle Messwertpaare einer Geschwindigkeitsklasse werden mit den korrespondierenden Grenzen der Bewertungssysteme verglichen und die Anzahl für das Auftreten der jeweiligen Ereigniskombinationen wird ermittelt. Ausgewertet wurden insgesamt 418 Strecken über die Geschwindigkeiten 40, 60 und 80 km/h. In Tabelle 21 ist dazu das Ergebnis dargestellt.

418 Fälle	$A_x A_y$	$A_x R_y$	$A_y R_x$	$R_x R_y$	$A_x A_y$	$A_x R_y$	$A_y R_x$	$R_x R_y$	$A_x A_y$	$A_x R_y$	$A_y R_x$	$R_x R_y$
Zustands- wert	40 km/h, Fallanzahl n = 63				60 km/h, Fallanzahl n = 227				80 km/h, Fallanzahl n = 128			
1,0	3	26	0	34	1	39	0	187	3	31	0	94
1,5	3	34	0	26	3	61	1	162	4	33	0	91
2,0	6	44	0	13	11	81	5	130	8	54	0	66
3,0	21	42	0	0	28	119	8	72	31	60	1	36
3,5	22	41	0	0	46	131	0	50	44	69	0	15
4,0	25	38	0	0	73	124	0	30	44	81	0	3
4,5	38	25	0	0	99	114	0	14	53	74	0	1
5,0	43	20	0	0	139	82	0	6	90	37	0	1
Abnahmewert	7	54	0	2	17	88	7	115	19	49	3	57
Verjäh- rungs- wert	21	42	0	0	24	111	8	84	27	60	1	40
Summe	189	366	0	75	441	950	29	850	323	548	5	404

Tabelle 21: Häufigkeit der Ereigniskombinationen, unterschieden nach Geschwindigkeitsklassen

Wird die Anzahl der Entscheidungen unabhängig von der Geschwindigkeitsklasse betrachtet, können die Zahlenwerte gleicher Ereignisse zusammengefasst werden. Tabelle 21 wird damit zu:

	$A_x A_y$	$A_x R_y$	$A_y R_x$	$R_x R_y$
Gesamtanzahl	953	1.864	34	1.329

Tabelle 22: Summe des Auftretens der Ereigniskombinationen unabhängig von den Geschwindigkeitsklassen

Zur Beurteilung der Gültigkeit des Bewertungshintergrundes GripTester unter den genannten Voraussetzungen sind folgende Fragen sind zu beantworten:

- (1) Mit welcher Wahrscheinlichkeit wird der Abschnitt durch den GripTester mit ‚gut‘ beurteilt, wenn der Abschnitt durch die SCRIM mit ‚schlecht‘ beurteilt wurde?
- (2) Mit welcher Wahrscheinlichkeit wird der Abschnitt durch den GripTester mit ‚gut‘ beurteilt, wenn der Abschnitt durch die SCRIM mit ‚gut‘ beurteilt wurde?
- (3) Mit welcher Wahrscheinlichkeit wird der Abschnitt durch die SCRIM mit ‚gut‘ beurteilt, wenn der Abschnitt durch den GripTester mit ‚gut‘ beurteilt wurde?

Durch die Fragen werden Ereignisse definiert, die nur unter bestimmten Voraussetzungen oder Bedingungen eintreten. Die Wahrscheinlichkeiten dazu werden als bedingte Wahrscheinlichkeiten ermittelt. Die gesuchten Wahrscheinlichkeiten ermitteln sich dann folgendermaßen:

Frage 1:

$$W(A_y | R_x) = W(A_y R_x) / W(R_x),$$

Frage 2:

$$W(A_y | A_x) = W(A_x A_y) / W(A_x),$$

Frage 3:

$$W(A_x | A_y) = W(A_x A_y) / W(A_y).$$

Dazu sind die Wahrscheinlichkeiten der Ereignisse R_x und A_x zu bestimmen. Für das Ereignis R_x sind alle Fälle günstig, bei denen das Prüfverfahren SCRIM zu Ablehnung bzw. zur Beurteilung ‚schlecht‘ kommt. Dabei ist unerheblich, zu welcher Beurteilung das Prüfverfahren GripTester gekommen ist. Es gilt deshalb

$$W(R_x) = W(A_y R_x) + W(R_y R_x).$$

Analog werden die Betrachtungen für $W(A_x)$ und $W(A_y)$ vorgenommen:

$$W(A_x) = W(A_x A_y) + W(R_y A_x),$$

$$W(A_y) = W(A_x A_y) + W(R_x A_y).$$

In **Tabelle 22** werden die Anzahl der Ereignisse und Ereigniskombinationen bestimmt.

Ereignisse	A_x	A_y	$A_x A_y$	$A_y R_x$	R_x
Berechnung	$953 + 1.864$	$953 + 34$	-	-	$34 + 1.329$
Anzahl der Ereignisse	2.817	987	953	34	1.363

Tabelle 23: Ermittlung der Ereignisanzahl

	Berechnung	Geschätzte Wahrscheinlichkeit
$W(A_x A_y)$	$953/987$	0,966
$W(A_y R_x)$	$34/1.363$	0,025
$W(A_y A_x)$	$953/2.817$	0,338

Tabelle 24: Ermittlung der bedingten Wahrscheinlichkeiten

Die bedingten Wahrscheinlichkeiten lassen folgende Schlüsse zu:

- (1) Wenn ein Abschnitt mit dem GripTester beurteilt wird und dieser zur Beurteilung ‚gut‘ kommt, dann würde mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 3 % die SCRIM zur Beurteilung ‚schlecht‘ kommen.
- (2) Wenn ein Abschnitt mit dem GripTester beurteilt wird und dieser zur Beurteilung ‚gut‘ kommt, dann würde mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 97 % die SCRIM ebenfalls zur Beurteilung ‚gut‘ kommen.
- (3) Wenn ein Abschnitt mit der SCRIM beurteilt wird und diese zur Beurteilung ‚gut‘ kommt, dann würde mit einer Wahrscheinlichkeit von ca. 34 % der GripTester zur Beurteilung ‚gut‘ kommen.

Wird also ein Abschnitt mit dem GripTester als ‚gut‘ beurteilt, dann ist mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die Beurteilung mit der SCRIM auch ‚gut‘.

Wertung und Konsequenzen für die praktische Umsetzung

Beim Vergleich der bedingten Wahrscheinlichkeiten zeigte sich, dass bei Beurteilung mit dem GripTester sicher dann auf eine Beurteilung mit der SCRIM geschlossen werden kann, wenn die Beurteilung mit dem GripTester ‚gut‘ ist. Wird also an einem Abschnitt mit dem GripTester eine ausreichende Griffbarkeit nachgewiesen, so kann davon ausgegangen werden, dass dann auch mit der SCRIM die Griffbarkeit als ausreichend beurteilt worden wäre. Kommt

die Beurteilung mit dem GripTester zum Schluss einer nicht ausreichenden Griffbarkeit, darf hingegen nicht zwingend auf eine nicht ausreichende Griffbarkeit bei Beurteilung mit der SCRIM geschlossen werden; die Griffbarkeit kann trotzdem ausreichend sein.

Für die Prüfpraxis heißt das: Solange mit dem GripTester eine ausreichende Griffbarkeit nachgewiesen wird, kann dieses Ergebnis sicher als ‚ausreichend‘ betrachtet werden. Wird mit dem GripTester ein Wert kleiner als der Anforderungswert festgestellt, dann sind eventuell weitere Messungen mit der SCRIM erforderlich. Die bedingten Wahrscheinlichkeiten haben gezeigt, dass der BWH des GripTesters eine durchaus ‚hohe Durchfallquote‘ hat.

Nur eine von drei Strecken mit ausreichender Qualität wird durch den BWH als solche erkannt. Die anderen beiden Strecken fallen durch. Damit beinhaltet das hier entwickelte Bewertungssystem des GripTesters für den Prüfenden ein gewisses Risiko im Einsatz. Der Prüfende oder der von ihm Beauftragte muss sich bei der Wahl des Prüfverfahrens dessen bewusst sein.

In der Prüfpraxis könnte derzeit der GripTester dann gut eingesetzt werden, wenn das Griffbarkeitsniveau des zu untersuchenden Abschnittes ohnehin recht hoch ist und die Wahrscheinlichkeit damit sehr hoch ist, dass der Abschnitt die Anforderungen erfüllt (z.B. Neubau). In den Fällen mit geringerem Griffbarkeitsniveau ist eine Beurteilung mit dem GripTester auf der Grundlage dieses Bewertungssystems nicht generell empfehlenswert, da mit einer hohen Wahrscheinlichkeit eine Nachmessung mit der SCRIM zur Beurteilung des negativen Ergebnisses des GripTesters erforderlich wird.

4 Zusammenfassung

Mit dem GripTester steht ein weiteres Griffbarkeitsmessverfahren neben der SCRIM und dem SRM für den Einsatz in Deutschland zur Verfügung. Die geringe Baugröße des Gerätes und die damit verbundene gute Manövrierfähigkeit lassen gute Einsatzmöglichkeiten dieses Verfahrens auf kleineren Straßen und Straßen mit engen Kurvenradien erwarten. Voraussetzung für den Einsatz des GripTesters ist eine ausreichende Verfahrenspräzision und ein Bewertungssystem zur Beurteilung der Messergebnisse.

Inhalt dieser Arbeit ist die Formulierung eines Bewertungssystems für den GripTester. Die Präzision des GripTesters wurde bereits in Ringuntersuchungen festgestellt.

Mit unterschiedlichen Messverfahren werden unter Umständen verfahrensbedingt unterschiedliche Zahlenwerte als Messwert bestimmt. In Hinblick auf die nachgeschaltete Beurteilung des Messwertes sollten jedoch keine Unterschiede zwischen unterschiedlichen

Messverfahren auftreten. Die SCRIM gilt als etabliertes mobiles Verfahren im Einsatz der ZEB und bei Messungen im Rahmen des Bauvertrages.

Zielstellung dieser Arbeit war es, ein Bewertungssystem für den GripTester zu entwickeln, welches das Bewertungssystem der SCRIM berücksichtigt und bei seiner Anwendung nicht im Widerspruch zur Beurteilung mit der SCRIM steht.

Die Lösung dieser Aufgabe wurde in einem Bewertungssystem für den GripTester gesehen, das nach den gleichen inhaltlichen Grundsätzen des Bewertungssystems der SCRIM aufgebaut ist.

Dazu wurde zunächst das Bewertungssystem SCRIM analysiert und es wurden die Randbedingungen für dessen Formulierung beschrieben. Griffigkeit ist eine Prüfgröße mit besonderen Eigenschaften. Die besonderen Eigenschaften liegen in der Art und Weise ihrer Bestimmung. Um die Ergebnisse der Griffigkeitsmessung weiter zu betrachten, musste ein mathematisches Modell zur Beschreibung des Verhältnisses aus richtigem Wert, wahren Wert, Messwert und Messwertabweichung geschaffen werden. Mit diesem Modell war die Grundlage für eine weitere mathematisch-statistische Betrachtung gelegt. Ein Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Definition eines solchen Modells für den Griffigkeitswert.

Der Vergleich von Griffigkeitsmesswerten zwischen unterschiedlichen Messverfahren war bereits Gegenstand unterschiedlicher Untersuchungen und Modellierungen. Hervorzuheben sind dazu die Modelle IFI und EFI. Sie gründen sich auf der Annahme, dass verfahrensbedingt verschiedene Zahlenwerte der Griffigkeit ihre Ursache in der Wirkung unterschiedlicher Gleitgeschwindigkeiten auf der Textur haben. Es zeigte sich aber, dass diese Modelle für die hier angestrebte Zielsetzung nicht verwendbar waren.

Es wurde deshalb in dieser Arbeit eine eigene Strategie für die Entwicklung des Bewertungssystems GripTester entworfen. Ausgangspunkt war die Struktur des Bewertungssystems SCRIM. Das zu entwickelnde Bewertungssystem GripTester sollte von seiner Struktur ähnlich gestaltet sein, um die Auswirkungen einer anderen Struktur der Bewertungssysteme auf Unterschiede in der resultierenden Beurteilung möglichst klein zu halten. Durch den Vergleich der Messwerte von GripTester und SCRIM sollte der technische Zusammenhang zwischen den Prüfgrößen (Zusammenhang der wahren Werte) in Form von Kalibrierlinien ermittelt werden. Mit Hilfe der Kalibrierlinien ist die ‚Umrechnung‘ von Werten des GripTesters in SCRIM-Werte und von SCRIM-Werten in GripTester-Werte möglich. Die Strategie sah vor, die Anforderungswerte von dem Bewertungssystem SCRIM in Anforderungswerte des GripTesters zu transformieren.

Zur Ermittlung von Kalibrierlinien werden in der Regel spezielle Kalibrierversuche durchgeführt. Sie werden unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen durchgeführt und

haben Mindestanforderungen bezüglich der Rahmenbedingungen. Diese Versuche sind für Griffigkeitsmessungen mit hohem Aufwand verbunden. Beim Erstellen der vorliegenden Arbeit konnte nicht auf Erfahrungen und Messwerte aus solchen Kalibrierversuchen zurückgegriffen werden. Es wurde deshalb ein Weg gesucht um aus den vergleichenden Messdaten anderer Untersuchungen eine Datenbasis für die Auswertung zusammenzustellen. Voraussetzung dafür waren Messungen mit dem GripTester und der SCRIM, die auf den gleichen Straßenabschnitten unter Vergleichbedingungen ermittelt wurden. Die Messdaten wurden hinsichtlich ihrer Genauigkeit eingeschätzt und anschließend wurde ein Modell für die Berücksichtigung unterschiedlich genauer Messwerte in einer vereinheitlichten Datenbasis entwickelt.

Aus der resultierenden Datenbasis wurden unterschiedliche Klassen an Messwerten bestimmt. Die Klasseneinteilung richtete sich nach Maßstäben der Praktikabilität und sollte später leicht auf Messdaten anwendbar sein. Als Einteilungskriterium wurde beispielsweise die Sollmessgeschwindigkeit gewählt, da Messwerte in der Messpraxis meist über diese Information verfügen und sich danach unterscheiden lassen. Grund für die Klassifizierung war die Annahme, dass die an solchen Klassen entwickelten Kalibrierlinien präziser (geringere Modellfehler) sind als Kalibrierlinien über alle Messdaten.

Für die Entwicklung der Kalibrierlinien musste ein mathematischer Ansatz gefunden werden und anschließend wurden die Parameter für diesen Ansatz bestimmt. Die Wahl des mathematischen Ansatzes ist willkürlich. Je mehr sich jedoch der gewählte Ansatz vom tatsächlichen Ansatz unterscheidet, desto größer sind die implizierten Modellfehler. Die Strategie dieser Arbeit sah vor, möglichst Ansätze mit einer geringen Anzahl an zu bestimmenden Parametern anzuwenden. Es wurde deshalb ein linearer und ein proportionaler Ansatz verwendet. Für beide Ansätze waren gute Gründe für deren Anwendung vorhanden.

An den gefundenen Datenklassen wurden die Parameter für den linearen und den proportionalen Ansatz bestimmt. In der anschließenden Signifikanzuntersuchung wurde festgestellt, ob die gefundenen Unterschiede zwischen den Parametern zufällig oder systematisch waren. Waren die Unterschiede nur zufällig, so wurden die Datenklassen neu strukturiert und an diesen Datenklassen die Parameter nochmals bestimmt. Im Ergebnis lagen für die definierten Datenklassen Kalibrierlinien mit linearem und proportionalem Ansatz vor.

Für die anschließende Transformation der Anforderungswerte können unterschiedliche Übertragungsmodelle (hier zwei) unter Nutzung der Kalibrierlinien verwendet werden. Aus statistischer Sicht konnte keinem Modell der Vorzug gegeben werden. Es wurden deshalb beide Modelle einer weiteren Betrachtung unterzogen.

In den für die Transformation der Anforderungswerte durchgeführten Berechnungsläufen wurden das Übertragungsmodell, der mathematische Ansatz für die Kalibrierlinie und die Verteilungsfunktionen des BWH SCRIM variiert. Die Transformation erfolgte getrennt nach Datenklassen für die Sollmessgeschwindigkeiten 40, 60 und 80 km/h. Das Ergebnis dieser Berechnungsläufe waren verschiedene Sätze an Anforderungswerten. Die Anforderungswerte wurden einer Plausibilitätsbetrachtung unterzogen und mit dem bekannten Wissen über Abhängigkeiten des Griffigkeitsmesswertes von den Randbedingungen abgeglichen. Wurden unplausible Anforderungswerte festgestellt, so wurden die Gründe dafür gesucht und bei einer erneuten Transformation berücksichtigt. Der Ansatz auf geschwindigkeitsspezifische Kalibrierlinien musste dabei aufgegeben werden.

Die Kalibrierlinien beschreiben den technischen Zusammenhang zwischen den Griffigkeitswerten des GripTester und der SCRIM nicht vollständig. Die beobachteten Abweichungen der Messwerte von den Kalibrierlinien setzen sich zusammen aus den messbedingten Abweichungen und den Modellfehlern der Kalibrierlinie. Diese Modellfehler sind ‚ungerichtet‘ und haben ihre Ursache nicht in den Messverfahren selbst, sondern treten nur im Zusammenhang mit dem angestrebten Vergleich auf. Zur Berücksichtigung dieser Abweichungen mussten zunächst ihre Größen ermittelt werden. Dazu wurden unterschiedliche Verfahren angewendet. Im Ergebnis dieser Untersuchung konnten die Abweichungen zwischen SCRIM- und GripTester-Werten in die Berechnung einbezogen werden.

Mit Entwicklung von Kalibrierlinien liegt die bidirektionale Transformationsmöglichkeit der Messwerte vor. Ein GripTester-Messwert kann in einen SCRIM-Messwert umgerechnet werden und umgekehrt. Die beobachteten Abweichungen werden im Konfidenzintervall des Transformationswertes berücksichtigt. Mit dem Konfidenzintervall kann die Lage des wahren Wertes zu einer vorgegebenen oberen bzw. unteren Grenze (oder auch Anforderungswert) beurteilt werden.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit können beispielsweise mit dem GripTester auf einem Streckenabschnitt gemessenen Werte in SCRIM-Werte transformiert werden. Die prüfbedingten Abweichungen und die Modellfehler werden im Konfidenzintervall des SCRIM-Wertes berücksichtigt. Der transformierte SCRIM-Wert lässt sich nun mit den Anforderungswerten des SCRIM-Bewertungssystems vergleichen. Je nach Fragestellung lassen sich unterschiedliche Aussagen ableiten.

Der Auftragnehmer einer Maßnahme will die Sicherheit haben, dass die Anforderungen an einen Abschnitt sicher eingehalten sind. Er wird den Messwert auf sichere Überschreitung eines Anforderungswertes mit seiner unteren Grenze testen. Der Auftraggeber hingegen

könnte Interesse an der sicheren Unterschreitung eines Grenzwertes haben, da sich daraus Handlungskonsequenzen ergeben. Dieses Vorgehen setzt jedoch immer die Transformation des Messwertes voraus und erscheint nicht immer leicht praktikabel.

Einfacher erscheint es deshalb, und dies ist ebenso Ergebnis der Arbeit, die Anforderungswerte der SCRIM für die vorgegebenen Perzentilwerte in Anforderungswerte des GripTesters zu transformieren und damit ein eigenes Bewertungssystem für den GripTester zu schaffen. Das Bewertungssystem besteht aus eigenen Anforderungswerten für den GripTester. Prämisse bei der Formulierung dieser Anforderungswerte sollte die Widerspruchsfreiheit zur Beurteilung nach SCRIM sein. Es wurde als Anforderung formuliert:

„Wenn ein Abschnitt mit dem GripTester die Anforderungen erfüllt, dann soll mit hoher Wahrscheinlichkeit die Erfüllung der Anforderung mit der SCRIM ebenfalls erfolgen.“

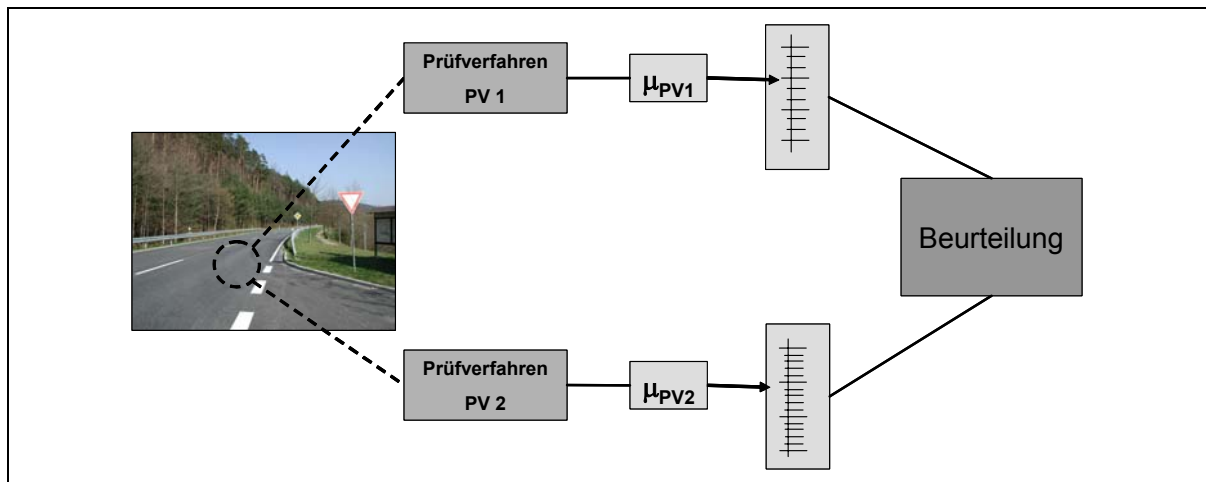


Abbildung 38: Beurteilung eines konkreten Messgegenstandes nach unterschiedlichen Prüfprinzipien

Die Modell- und Messabweichungen wurden entsprechend bei den Anforderungswerten des GripTesters erhöhend berücksichtigt. Durch die Berechnungsläufe waren mehrere ‚Sätze‘ an Anforderungswerten für die vorgegebenen Perzentile entstanden. Im Sinne der obigen Forderung wurden jeweils die höchsten Anforderungen für den jeweiligen Perzentilwert festgelegt.

In einer anschließenden Plausibilitätsprüfung wurden die Häufigkeiten von gleich lautenden und gegensätzlichen Beurteilungen durch das Bewertungssystem SCRIM überprüft. Dazu wurden simultan durchgeführte Messungen nach dem Bewertungssystem SCRIM und anschließend nach dem Bewertungssystem GripTester beurteilt. Es zeigte sich, dass in 97 % aller untersuchten Fälle eine bestandene Anforderung nach dem Bewertungssystem GripTester auch zu einem Bestehen nach dem Bewertungssystem SCRIM geführt hätte.

Im praktischen Einsatz dieses Bewertungssystems kann also aus dem Bestehen der GripTester-Anforderungen auf das Bestehen der Anforderungen mit der SCRIM geschlossen werden. Der Umkehrschluss ist jedoch nicht zulässig. Werden die Anforderungen nach dem Bewertungssystem GripTester nicht eingehalten, so folgt daraus nicht automatisch das ‚Nichtbestehen‘ nach SCRIM. In solchen Fällen sind Nachmessungen mit der SCRIM notwendig.

Allerdings wird diese hohe Wahrscheinlichkeit in der Übereinstimmung mit einem Nachteil erkauft: Die Sicherheitszuschläge sind hoch und damit sind auch die Anforderungen an das Prüfmerkmal GripTester hoch. Der Nachteil dieser Beurteilung ist auch, dass die Anforderungen so hoch geworden sind, dass nur jede dritte nach SCRIM bestandene Strecke mit dem GripTester detektiert werden kann. So bleibt die Anwendung dieses Bewertungssystems für den GripTester Streckenabschnitten vorbehalten, die ohnehin bereits über eine hohe Griffbarkeit verfügen.

5 Ausblick

Die Messung und anschließende Bewertung von Griffbarkeitswerten ist ein wesentlicher Beitrag zur Verbesserung der Verkehrsqualität und Sicherheit auf Straßen. Es werden unterschiedliche mobile Systeme für die Erfassung der Griffbarkeit eingesetzt, die kontaktbezogen die Kräftewirkung zwischen Reifen und Fahrbahn simulieren. Bemühungen der letzten Jahre um berührungslose Verfahren hatten noch keinen ausreichenden Erfolg.

Wesentlicher Vorteil der kontaktbezogenen Verfahren scheint die technische Nähe in der Simulation der Reifenreibung zu sein. Die Unterschiede zwischen den Messwerten verschiedener Verfahren und bei Messwiederholungen zeigen jedoch die Probleme solcher Messungen in Abhängigkeit der Messrandbedingungen. Die Untersuchungen zum Unfallgeschehen haben zudem nur einen schwachen Zusammenhang zwischen den Griffbarkeitsmesswerten und Unfallkennzahlen gezeigt.

Die Problematik, konkrete Anforderungswerte aus dem Zusammenhang zwischen Messwerten und Unfällen abzuleiten, mündete in Bewertungssystemen mit pragmatischen Festlegungen. Die Festlegungen für die Anforderungswerte sind damit willkürlich. Das daraus resultierende Bewertungssystem hat nur begrenzte Aussagefähigkeit in Hinblick auf die Unfallvermeidung. Zwischen dem Modell des Bewertungssystems eines Verfahrens und dem Modell der Unfallursachen ist Raum für weitere Forschungen.

Untersuchungen der letzten Jahre zur Verfahrenspräzision zielte auf die Genauigkeit und die genaue Fixierung der Einsatzbedingungen innerhalb der Modellgrenzen des Verfahrens. Zum messtechnischen Einsatz eines Verfahrens und einer anschließenden Beurteilung innerhalb des

Bewertungssystems ist dieses Vorgehen notwendig. Für eine Verwendung der Messwerte außerhalb dieses Bewertungssystems darf diese angestrebte hohe Präzision hinterfragt werden. Zwar scheint eine messtechnisch hohe Genauigkeit immer anstrebenswert, die inhaltliche Relevanz und Präzision bei der Interpretierbarkeit des Messwertes sind jedoch genauso wichtig.

Strebt man einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Griffigkeitsmessverfahren an, so verlässt man jeweils die Grenzen der Bewertungssysteme und begibt sich, bildlich gesprochen, in einen Raum zwischen diesen Bewertungssystemen. Die Forderung nach einer ausreichenden Interpretierbarkeit des Messwertes hat dann besondere Bedeutung. Nach dem derzeitigen Stand des Wissens hat sich noch kein Verfahren für Griffigkeitsmessungen durchgesetzt, dessen Messwerte relevanter erscheinen als andere. Nicht zuletzt liegt das daran, dass für die Einsetzbarkeit von Griffigkeitsverfahren sehr praktische Kriterien eine Rolle spielen und die Übereinstimmung des Messwertes mit tatsächlichem Reibverhalten dann eine geringere Rolle spielt. Für die Kontrolle der Griffigkeitsentwicklung eines Straßenabschnittes sind nur relativierende Betrachtungen notwendig. Die zu beantwortende Frage bestimmt damit die Einsatzgrenzen des jeweiligen Bewertungssystems.

Mit dem in dieser Arbeit angestrebten Messwertvergleich wurden die Grenzen des Verfahrens GripTester verlassen, um eine Verbindung zum Verfahren SCRIM herzustellen. Die dabei beobachteten großen Unterschiede sind den unterschiedlichen Messprinzipien geschuldet und liegen weder allein an dem einem noch allein an dem anderen Verfahren. Ein wesentlicher Teil der Bemühung konzentrierte sich dabei auf die mathematisch exakte Beschreibung dieser Verbindung. Die Vergleichbarkeit wurde realisiert, die Frage der Relevanz beider Messwerte sollte und konnte nicht beantwortet werden. Letztendlich bleibt es der konkreten Anwendung überlassen, ob ein solcher Vergleich genutzt wird oder ob ein eigenständiges Bewertungssystem für den GripTester entwickelt werden muss. Weiterführende Forschung in der Vergleichbarkeit sollte sich zunächst der Datenbasis widmen. Wichtig erscheint dabei die Messwertermittlung unter Vergleichbedingungen und die Repräsentanz der Messstrecken. Eine höhere Messergebnisanzahl erbringt eine höhere Sicherheit bei den bestimmten Parametern. Hier standen für diese Arbeit stellenweise (z.B. unterschiedliche Betontexturen) zu wenig Messergebnisse zur Verfügung.

Die auf dem statistisch-pragmatischen Ansatz beruhenden Bewertungssysteme, wie das der SCRIM, lassen die Beurteilung einer Strecke vor der Gesamtheit aller Strecken und deren tendenzielle Griffigkeitsentwicklung und Griffigkeitsprognose zu. Im Rahmen der weiteren Unfallforschungen scheint diese angewendete Verfahrenspraxis eher ungeeignet. Der Messwert muss in seiner Aussagerelevanz auf die Reibung zwischen Reifen und Fahrbahn erhöht werden. Es ist technisch bereits möglich, Sensoren in die Laufflächen von Reifen

einzubetten, welche die Temperatur und Veränderungen im Reibungszustand messen können. Problematisch sind derzeit noch die Energieversorgung und die Signalübertragung. Werden diese Probleme gelöst, so stünde eine Möglichkeit zur Verfügung, den momentanen und aktuellen Griffigkeitszustand zu erfassen. Kritische Fahrbahnzustände könnten damit während der Befahrung erkannt und registriert werden. Moderne Systeme der Car-to-car-Kommunikation können solche kritischen Abschnitte dem folgenden Verkehr oder einer zentralen Erfassung melden. Diese Informationen, verbunden mit einer Orts-Zeit-Referenzierung, könnten in Datenbanken gesammelt und statistisch ausgewertet und so die Bereiche detektiert werden, die offensichtlich unter Griffigkeitsproblemen leiden. Soll ein solches Szenario zur Anwendung kommen, müsste sichergestellt werden, dass auch wenig oder nur selten befahrene Abschnitte über eine ausreichende Überwachung des Griffigkeitszustandes verfügen.

Anlagenverzeichnis

- Anlage A1** 100 m-Mittelwertvergleich SCRIM-GripTester, Proportionaler Regressionsansatz für unterschiedliche Gruppen von Daten unter Variation der Sollmessgeschwindigkeit und Deckschichtmaterials
- Anlage A2** 100 m-Mittelwertvergleich SCRIM-GripTester, Linearer Regressionsansatz für unterschiedliche Gruppen von Daten, Variation der Sollmessgeschwindigkeit und des Deckschichtmaterials
- Anlage A3** 100 m-Mittelwertvergleich SCRIM-GripTester, Proportionaler Ansatz, Vergleich der Regressionsansätze für unterschiedliche Gruppen von Daten
- Anlage A4** 100 m-Mittelwertvergleich SCRIM-GripTester, Linearer Ansatz, Vergleich der Regression für unterschiedliche Gruppen von Daten
- Anlage A5** 100 m-Mittelwertvergleich SCRIM-GripTester, Proportionaler u. linearer Ansatz, mit und ohne Berücksichtigung der Punktgewichte
- Anlage A6** Residualuntersuchung an linearen und proportionalen Ansatz, mit und ohne Wichtung der Punkte
- Anlage A7** Test auf Normalverteilung der Residuen, bei linearen und proportionalem Ansatz
- Anlage A8** Regressionsansätze für Blickrichtung $X \rightarrow Y$ und $Y \rightarrow X$, Linearer Ansatz
- Anlage A9** Regressionsansätze für Blickrichtung $X \rightarrow Y$ und $Y \rightarrow X$, Proportionaler Ansatz
- Anlage A10.1** Zusammenstellung für Test auf signifikante Abweichung der Zusammenhangsfunktion (proportional)
- Anlage A10.2** Zusammenstellung für Test auf signifikante Abweichung der Zusammenhangsfunktion (linear)
- Anlage A11.1** T-Test auf signifikante Abweichung der Zusammenhangsfunktion (proportional)
- Anlage A11.2** F-Test auf signifikante Abweichung der Zusammenhangsfunktion (linear)
- Anlage A12.1** 100 m-Mittelwertvergleich SCRIM-GripTester, Linearer Regressionsansatz und Umkehrfunktion mit angedeuteter Kalibrierlinie
- Anlage A12.2** 100 m-Mittelwertvergleich SCRIM-GripTester, Proportionaler Regressionsansatz und Umkehrfunktion mit angedeuteter Kalibrierlinie
- Anlage A13.1** Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester mit Berücksichtigung gleicher Schlechteile, Möglichkeit A, geschwindigkeitsabhängige Kalibrierlinie, linear und proportional

-
- Anlage A13.1a** Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester mit Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile (alle Messdaten), Möglichkeit A, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinien, linear und proportional
- Anlage A13.1b** Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester mit Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile (nur Daten mit Geschwindigkeitsangabe), Möglichkeit A, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinie, linear und proportional
- Anlage A13.1c** Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester mit Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile (nur Daten mit Geschwindigkeitsangabe paritätisch), Möglichkeit A, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinie, linear und proportional
- Anlage A13.2** Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, Möglichkeit B, geschwindigkeitsspezifische Kalibrierlinien, linear und proportional
- Anlage A13.2a** Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile (alle Messdaten), Möglichkeit B, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinie, linear und proportional
- Anlage A13.2b** Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile (Daten mit Geschwindigkeitsangabe), Möglichkeit B, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinie, linear und proportional
- Anlage A13.2c** Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile (Daten mit Geschwindigkeitsangabe paritätisch), Möglichkeit B, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinie, linear und proportional
- Anlage A14** Anforderungswerte für den GripTester abgeleitet aus dem vorläufigen Bewertungshintergrund der Technischen Universität Darmstadt
- Anlage A15** Vergleich der Quantilwerte aus den Bewertungshintergründen von SCRIM und GripTester mit der Übereinstimmung der Werteabbildung über die Kalibrierlinien für 40, 60 und 80 km/h
- Anlage A16** Übertragene Quantilwerte auf den GripTester auf der Grundlage des Bewertungshintergrundes der SCRIM nach KLINGHAMMER/ GAST, 80 km/h, Möglichkeit A und Möglichkeit B
- Anlage A17.1** Anforderungswerte GripTester linearer und proportionaler Ansatz, Möglichkeit A
- Anlage A17.1a** Bewertungssystem GripTester, nur linearer Ansatz, Möglichkeit A und Sicherheitszuschlag
- Anlage A17.2** Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester Möglichkeit B
- Anlage A17.2a** Bewertungssystem GripTester, linearer und proportionaler Ansatz, Möglichkeit B
- Anlage A18** Bewertungssystem GripTester, linearer Ansatz, Vergleich von Möglichkeit A und B

Anlage A19 Relative Häufigkeiten in der Plausibilitätsprüfung

Literaturverzeichnis

Arbeitsanleitung GripTester: Arbeitsanleitung für Griffigkeitsmessungen mit dem LFC-Messverfahren, FGSV, Köln, **2007**

ARS 12/ 2002: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 12/ 2002, Straßenbefestigung, Oberflächeneigenschaften, BMVBW, **2002**

ARS 24/ 2003: Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 24/ 2003, Straßenbefestigung, Oberflächeneigenschaften, BMVBW, **2003**

BABTIE: Report on Correlation of SCRIM with the Mark 2 GripTester, Trial at TRL, Findlay Irvine Ltd Crowthorne, **2004**

Bald: Grundlagen für die Anwendung von Risikoanalysen im Straßenwesen, Dissertation, Darmstadt **1991**

Bald, Lutz, Pehlke, Weidich: Ermittlung der Präzision des Messsystems ‚Schlupf-Mess-Anhänger‘ SRMT (Slip Resistance Measuring Trailer), Entwurf des Schlussberichts zum FE 89.079/2000 der BAST, TU Darmstadt, **2002**

Bald, Lutz, Pehlke, Weidich: Bewertungshintergrund SRMT (Slip Resistance Measuring Trailer), Entwurf des Schlussberichts zum FE 89.079/2000 der BAST, TU Darmstadt, **2002**

Bald, Lutz, Weidich: Aktualisierung der Ermittlung von Vergleichs- und Wiederholstreubereichen von Griffigkeitsmesssystemen SCRIM FE 04.185/2000 der BAST, TU Darmstadt, **2003**

Bantel: Grundlagen der Messtechnik, Messunsicherheit von Messungen und Messgerät, Fachbuchverlag Leipzig, **2000**

Bathlet: Berechnung des Aquaplaningverhaltens von glatten und profillosen Reifen. Automobilzeitschrift, Heft 10, **1975**

Becker: Bewertungshintergrund für Griffigkeitsmessungen auf Bundesautobahnen mit der SCRIM, Bergisch Gladbach, **1992**

Benda H. v.: Die Skalierung der Gefährlichkeit von Straßenverkehrssituationen. Teil II: Die Skalierung der Gefährlichkeit, BAST, **1977**

Bott-Bodenhausen: Das Wahrnehmen von Handlungszielen anderer Verkehrsteilnehmer, Dissertation, München, **1972**

Braun, Ihme: Definition kritischer Situationen im Kfz-Verkehr eine Pilotstudie- Automobilindustrie Nr. 28, **1983**

Bundesministerium für Verkehr: Verkehr in Zahlen, Bonn **1984**

Cafiso, Di Graziano, Ippolito: Comparison of skid resistance value from different equipment, PIARC International Symposium ‘SURF2004’, Toronto, **2004**

Campell: The wet-pavement accident problem, breaking through. Aus Traffic Quarterly 25, S.209-214, **1975**

Cenek, Jamieson, McLarin, Brown: Use of the international friction index (IFI) to predict actual vehicle braking performance, Opus central laboratories and new Zealand police

Cenek, Jamieson, Towler: The influence of texture depth on skidding resistance, Opus central laboratories and new Zealand police

Carraro, Eckert, Kronesser, Müller: Die optische Wahrnehmungssicherheit-ein Faktor zur Erhöhung der Verkehrssicherheit, Hochschule für Verkehrswesen ‚Franz List‘, Dresden, 1979

Dames: Wasserfilmdicke und Reibungsbeiwert, Straßenbautagung Berlin 1970, FGSV, Köln

Dames: Griffigkeitsmessungen bei hohen Fahrgeschwindigkeiten, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 189, Bonn **1975**

Dames, Merckens, Bergmann: Neuermittlung des Bewertungshintergrundes für Ergebnisse von Griffigkeitsmessungen, Bonn-Bad Godesberg **1984**

Descornet: The hermes project, Belgian road Research centre, PIARC International Symposium ‘SURF2004’, Toronto, **2004**

Deutler: Statistische Verfahren zur Ermittlung und Nutzung der Kalibrierlinie zwischen zwei Prüfverfahren, Forschung Straßenbau und Verkehrstechnik Heft 859, Bonn, **2002**

Deutscher Asphaltverband e.V.: Asphaltdeckschichten mit anforderungsgerechter Griffigkeit, Bonn **2001**

DIN 55 350 Teil 13: Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin **1987**

DIN ISO 13473: Charakterisierung der Textur von Fahrbahnbelägen unter Verwendung von Oberflächenprofilen – Teil 1: Bestimmung der mittleren Profiltiefe, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin **1997**

DIN ISO 5725 Teil 1: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen, Teil 1: Allgemeine Grundlagen und Begriffe, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin **1997**

DIN ISO 5725 Teil 2: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen, Teil 2: Grundlegende Methode für die Ermittlung der Wiederhol- und

Vergleichspräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin **2002**

DIN ISO 5725 Teil 3: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen, Teil 3: Präzisionsmaße eines vereinheitlichten Messverfahrens unter Zwischenbedingungen, Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin **1997**

Domhan: Probleme der optischen Führung bei Nacht und Nässe. Straßenverkehrstechnik, Heft 5, S. 153-157, **1982**

Durth: Ein Beitrag zur Erweiterung des Modells für Fahrer, Fahrzeug und Straße in der Straßenplanung, Dissertation am FB Wasser und Verkehr TH Darmstadt, Darmstadt **1972**

Durth, Bald: Risikoanalysen im Straßenwesen, TH Darmstadt, Darmstadt **1987** (Heft 531, gelbe Reihe)

Ellinghaus: Wetter und Autofahren, Uniroyal-Verkehrsuntersuchung, Heft 10, **1983**

Engels: Beitrag zur Ermittlung eines geschlechtsspezifischen Verkehrsunfallrisikos, Arbeits- und Forschungsgemeinschaft für Straßenverkehr, Band 35, Köln **1982**

FGSV: Arbeitspapier Nr. 9/A 1 zur ZEB, Zustandsbewertung, Köln **2001**

Giannini, Boccassini: Recherches sur le relations existant entre les types de dextur des couches de roulement, les conditiones hydrologiques et les accidents, Symposion sur le Drainage des Route, Berne **1978**

Giles: International Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Berlin, **1968**

Graf, Henning, Stange, Wilrich: Formeln und Tabellen der angewandten mathematischen Statistik, Springer Verlag, Stuttgart, **1968**

Heidemann: Die Verteilung der Pkw-Geschwindigkeiten im Netz der Bundesautobahnen, Straße und Autobahn, Heft 5, **1984**

Heidemann: Auswertung kontinuierlich erhobener Geschwindigkeitsdaten an neuen automatischen Langzeitmeßstellen auf Autobahnen und Bundesstraßen. Straße und Autobahn, Heft 12, **1984**

Heidemann: Über die Abhängigkeit von Geschwindigkeiten auf Autobahnen und Bundesstraßen von der Tageszeit. Straßenverkehrstechnik, Heft 4, **1985**

Heinz: Erhöhtes Unfallrisiko bei Nässe – Versuch einer Quantifizierung, Straßenverkehrstechnik, Heft 6/**1981**

Hiersche, Tenzinger: Untersuchung des ursächlichen Zusammenhangs zwischen Unfallgeschehen und Griffigkeit, BMV, Bonn-Bad Godesberg **1989**

Hoffmann: Witterungsbedingte Veränderungen der Verkehrssicherheit und des Verkehrsablaufes auf innerstädtischen Autobahnen und Hauptverkehrsstraßen, Schlussbericht. Forschungsauftrag des Bundesministeriums für Verkehr, **1983**, Bonn

Höcker: Oberflächenentwässerung von Fahrbahnen und ihre Bedeutung für den Straßenentwurf; Dissertation TH Aachen, **1971**

Hörz: Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Berlin, **1968**

Hotop, Keller: Geschwindigkeitsentwicklung auf Bundesautobahnen, Straßenverkehrstechnik, Heft 4, **1983**

Huschek, Dames, Rittershofer: Griffigkeitsschwankungen von Fahrbahndecken, Bonn-Bad Godesberg **1994**

Huschek, Merzoug: Zusammenhang zwischen Rauheit und Griffigkeit, Technische Universität Berlin, BMVBW, **1997**

Kalender: Abfluss des Regenwassers von ideal ebenen Fahrbahnoberflächen. Dissertation TU Berlin, **1972**

Kalender: Querneigung und Fahrsicherheit-Mögliche Einflüsse der negativen Querneigung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 173, **1974**

Kamplade: Internationale Vergleichsmessungen zur Straßengriffigkeit im Rahmen der deutsch-französischen Zusammenarbeit, BASt, **1979**, Bergisch Gladbach

Kamplade, Schmitz: Erfassen und Bewerten der Fahrbahngriffigkeit mit dem Messverfahren SRM und SCRIM, BASt, Bergisch Gladbach, **1984**

Klinghammer, Gast: Statistische Auswertung der SCRIM-Messergebnisse aus der Zustandserfassung der Bundesautobahnen, Berlin JAHR

Knoflacher: Ergebnisse und Erfahrungen der Unfallauswertung. Aus Bericht des Institutes für Straßen- und Verkehrswesen der Technischen Universität Berlin, Heft 2, **1970**

Köhler: Zur Berücksichtigung der Griffigkeit von Asphaltstraßen im Rahmen der Straßenerhaltungsmanagements, Hannover **1993**

Kummer: Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Berlin, **1968**

Kummer, Meyer: Tentative Skid – resistance requirements for main highways, Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Berlin, **1968**

Lamm, Schlichter: Geschwindigkeitsverhalten von Fahrzeugkollektiven bei unterschiedlichen Witterungs- und Tageslichtbedingungen. Straße und Tiefbau, Heft 12, **1971**

López, Valdès, Garnica: Consideraciones para la aplicación del índice de fricción internacional en carreteras de México, Instituto mexicano del transporte, **2002**

Lucas: Messungen der geometrischen Rauheit und Wasserabfluß von der Straße, Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Berlin, **1968**

Massimo: Die Illusion zu wissen - Was hinter unseren Irrtümern steckt, Rowohlt Verlag, Hamburg **1997**

Maycock: Studies of the Skidding Resistance of Passenger Car Tires on Wet Surfaces, Proc, Instn. Mech. Ebgrs. 1965

Merkblatt Ringversuche Teil 1alt: Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 1: Grundlagen, FGSV, Köln **1986**

Merkblatt Ringversuche Teil 1: Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 1: Grundlagen zur Präzision von Prüfverfahren, FGSV, Köln **2000**

Merkblatt Ringversuche Teil 2alt: Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2: Behandlung von abweichenden Messwerten (Ausreißern), FGSV, Köln **1978**

Merkblatt Ringversuche Teil 2: Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 2: Erkennen und Behandeln von Ausreißern, FGSV, Köln **2003**

Merkblatt Ringversuche Teil 3: Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 3: Planung und Durchführung von Ringversuchen, FGSV, Köln **1979**

Merkblatt Ringversuche Teil 4: Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Teil 4: Auswertung von Ringversuchen und Errechnung von Prüf Fehlern, FGSV, Köln **1982**

Merkblatt Straßengriffigkeit: Merkblatt über die Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, FGSV, Köln **1968**

Merkblatt Untersuchungstrecken: Merkblatt über Anforderungen an Untersuchungstrecken, Köln, FGSV, **1980**

Measuring Systems for the Evaluation of Skid Resistance and Texture, Part 1: Conduction of the Experiment and Comparison of the repeatability standard deviations, **1999**

Meyer-Gramcko: Erkennen und Handeln in gefährlichen Situationen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Februar 1993

Meyer-Gramcko: Risikoverhalten und Vorsorgeverhalten, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 1993

Meyer, Hegmon, Gillespie: Locked-Wheel Pavement Skid Tester Correlation and Calibration Techniques, National Cooperative Highway Research, **1974**, Washington D.C.

Meyer: Internationales Colloquium über Straßengriffigkeit und Verkehrssicherheit bei Nässe, Berlin, **1968**

Petracezek: Experimentelle Ermittlung der Wasserfilmdicken auf Fahrbahnen unter natürlichen Bedingungen, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 195, **1975**

Sabey, Taylor: The known risks we run: the highway, TRRL-Report SR 567; **1980**

Sabey, Williams, Lupton: Factors Affecting the Friction of Tires on Wet Roads, SAE Paper No 700376, **1970**

Satterthwaite: An assessment of seasonal and weather effects on the frequency of road accidents in California. Aus Accident Analysis and Prevention No. 2, **1976**, S.87-96

Scharsching: Witterungsbedingungen –Verkehrsverhalten –Verkehrssteuerung, Bundesministerium für wirtschaftliche Angelegenheiten, Straßenforschung Heft 363, **1988**, Wien

Schulze: Griffigkeitsmessungen bei hohen Geschwindigkeiten. Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 189, Bundesminister für Verkehr, Bonn

Sömen: Risikokognition und –verhalten als Aspekt der Verkehrssicherheit, TÜV Rheinland, Köln, **1987**

Sömen: Leistungsmotivation, Zielsetzungsverhalten und Urteilsfähigkeit als kognitiv - motivationale Aspekte risikobezogener Entscheidungen im Straßenverkehr, TÜV Rheinland, Köln, **1987**

Stadler, Groh: Erfahrungen über Vergleichsmessungen zur Ermittlung der Griffigkeit von neuen Fahrbahnbelägen mit dem SRM und dem SCRIM Messprinzip, Inzell, **1998**

Stadler, Meir: Erfahrungen über Vergleichsmessungen auf der B306 zwischen Siegsdorf und Traunstein mit dem SRM und der SCRIM auf neuen Fahrbahndecken, Inzell, **1998/ 1999**

Steinauer, van der Sluis, Platen: Abnahmewerte für die Griffigkeit von Fahrbahnoberflächen, BMVBW, **2002**

Steinauer, Mayer, van der Sluis: Signifikante Griffigkeitswerte aus Verkehrssicherheitssicht, BMVBW, **2002**

TP Griff – StB (SCRIM): Technische Prüfvorschrift für Griffigkeitsmessungen im Straßenbau Teil: Messverfahren SCRIM, FGSV, Köln **2001**

van den Bol – de Jong, Fafié: Precision of Friction Models, Konferenz SURF 2004, Toronto Kanada, **2004**

Wanzke: Auswirkung trivialer Wetterfaktoren auf die Sicherheit des Straßenverkehrs unter besonderer Berücksichtigung des Stadtverkehrs, Hochschule für Verkehrswesen ‚Franz List‘, **1980**

Weissbuch, Die europäische Verkehrspolitik bis 2010: Weichenstellung für die Zukunft, Kommission der europäischen Gemeinschaften, Brüssel **2001**

Wilde: Objektive und subjektive Sicherheit im Wechselwirkungsbereich Fahrer-Straße, Berlin, **1981**

Winner: 4. Darmstädter Reifenkolloquium, Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik Nr. 511, Darmstadt, **2002**

Zoeppritz: Beitrag zur Definition der kritischen Wasserfilmdicke vom Standpunkt des Reifenherstellers aus, Referat für die 10. Sitzung des AA 4.6 Wasser, Fahrbahn und Verkehr, **1974**

ZTV-Asphalt-StB 01: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Asphalt, FGSV **2001**

ZTV-Beton-StB 01: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton. FGSV **2001**

ZTV-BEA-StB 98: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen, Asphaltbauweise. FGSV **1998**

ZTV-BEB-StB 02: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für die bauliche Erhaltung von Verkehrsflächen, Betonbauweise. FGSV **2002**

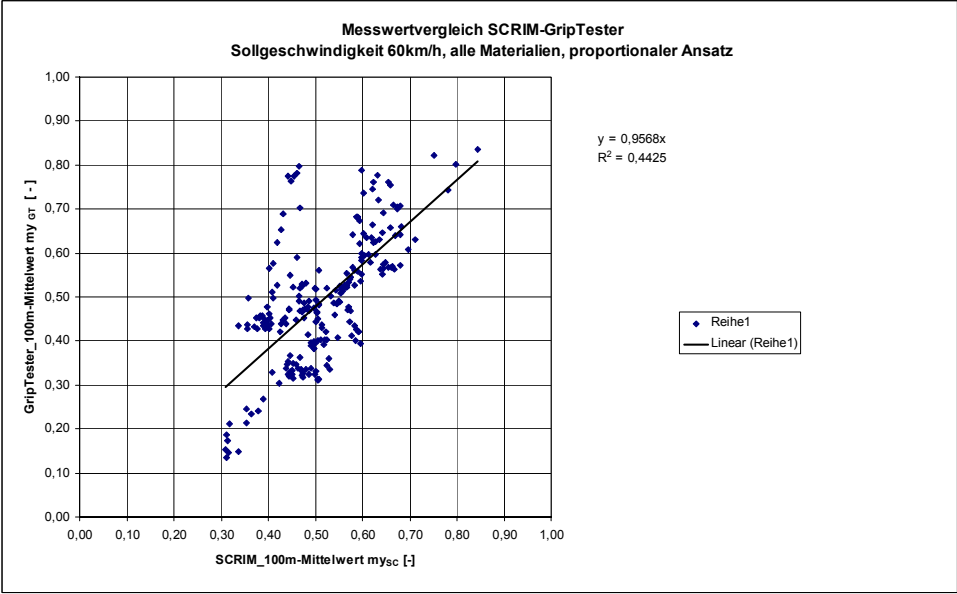
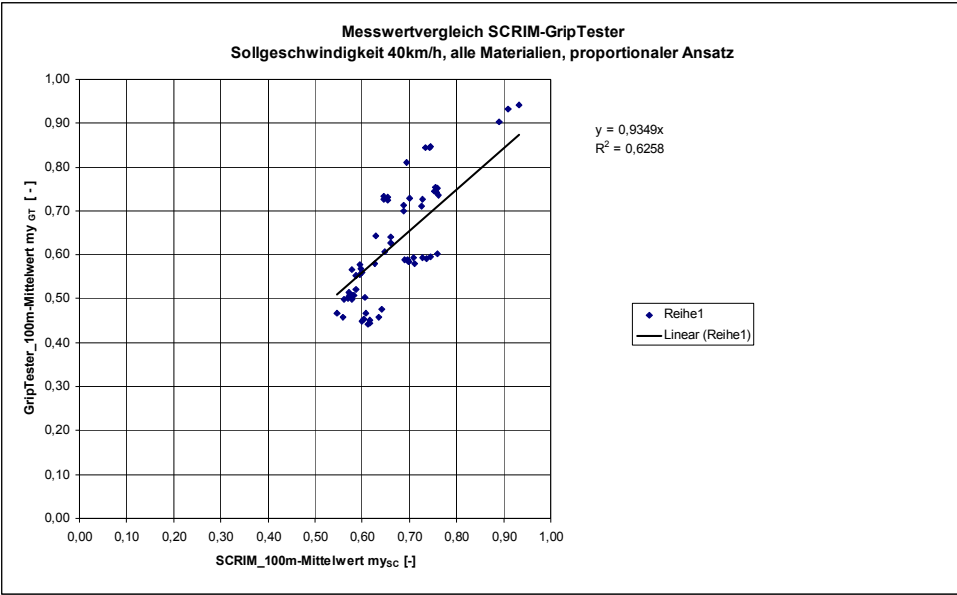


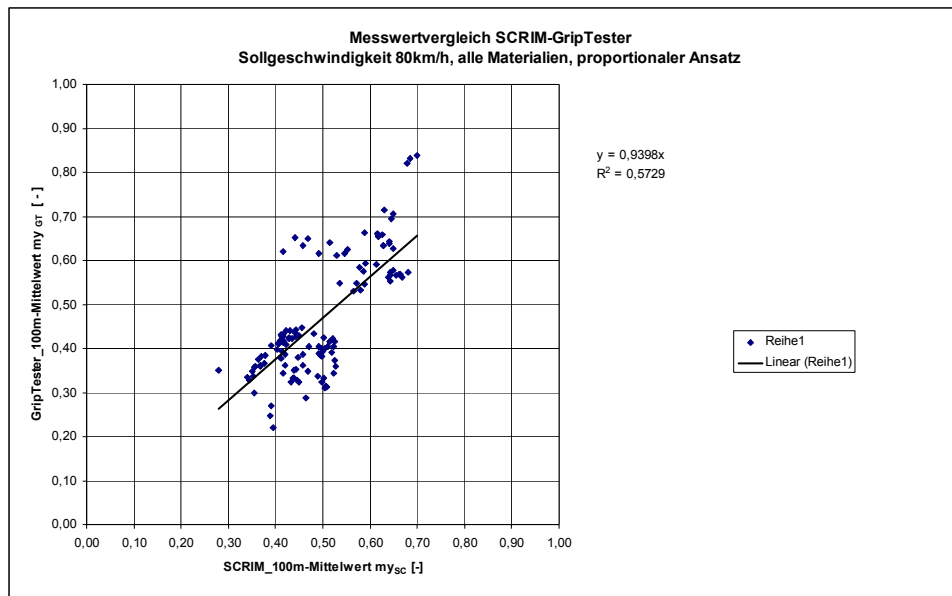
Anlagen

Die Ermittlung einer Bewertungsskala für das Griffigkeitsmesssystem GripTester unter Berücksichtigung der Bewertungsskala des SKM

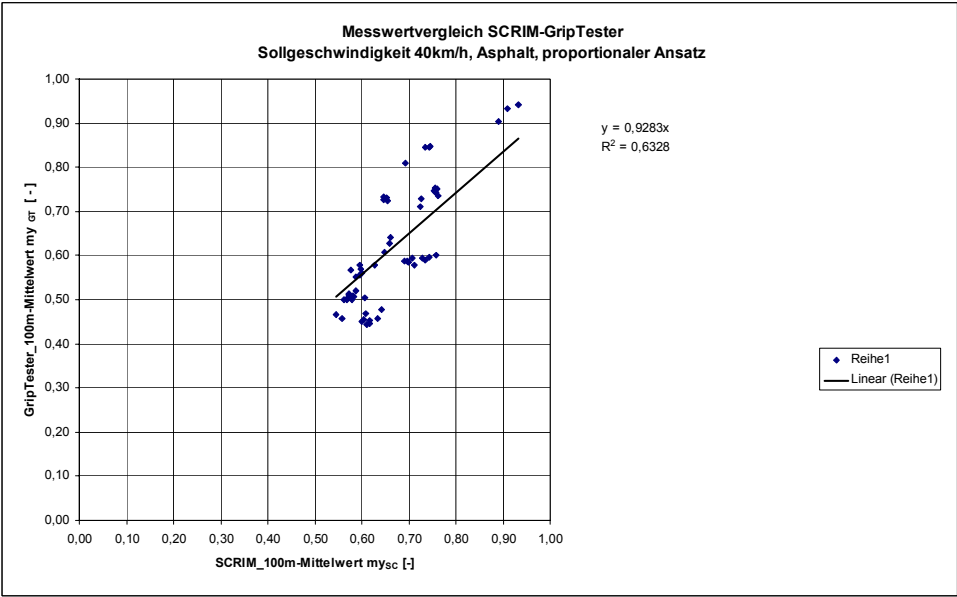
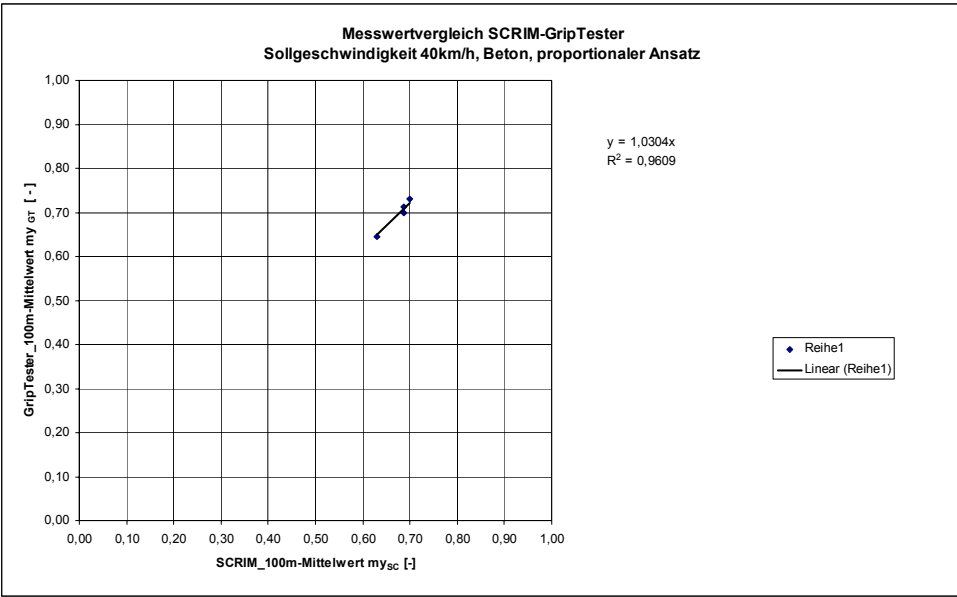
Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie
Technische Universität Darmstadt

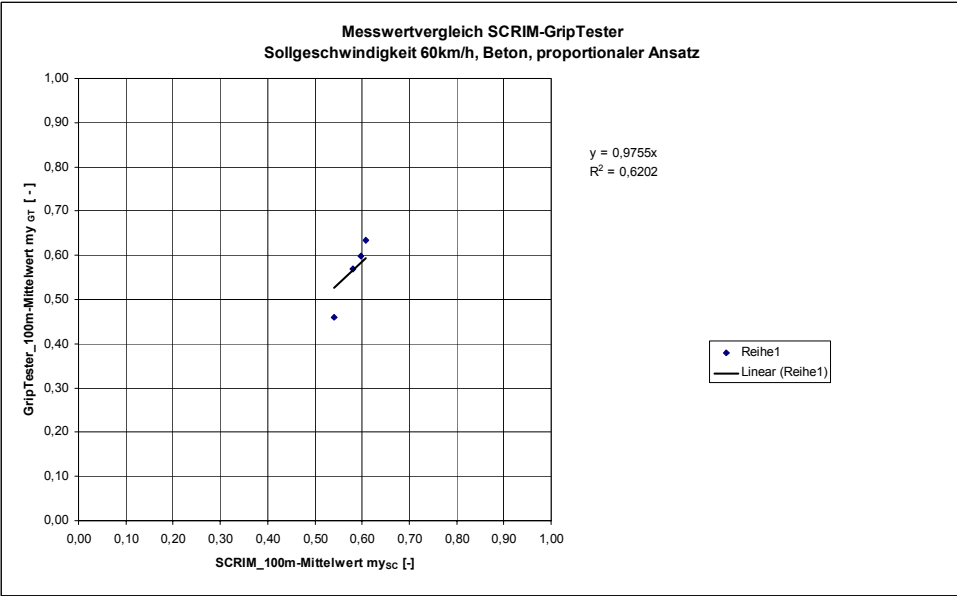
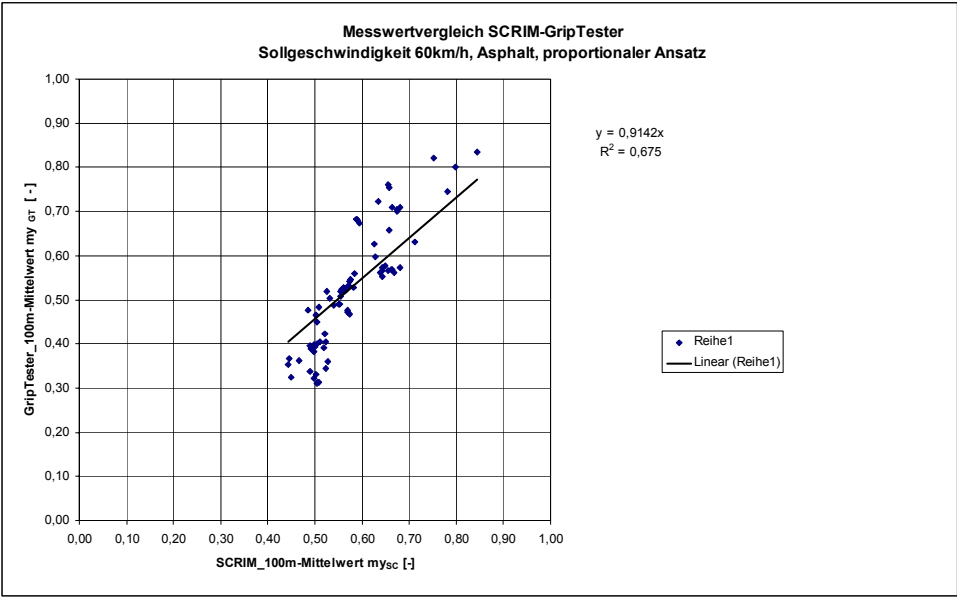
Jena, 2009

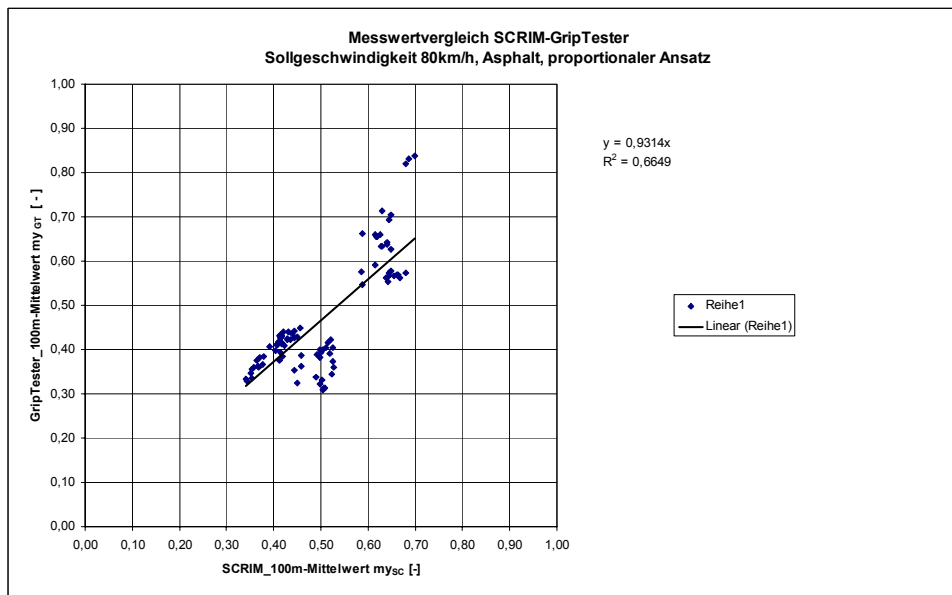
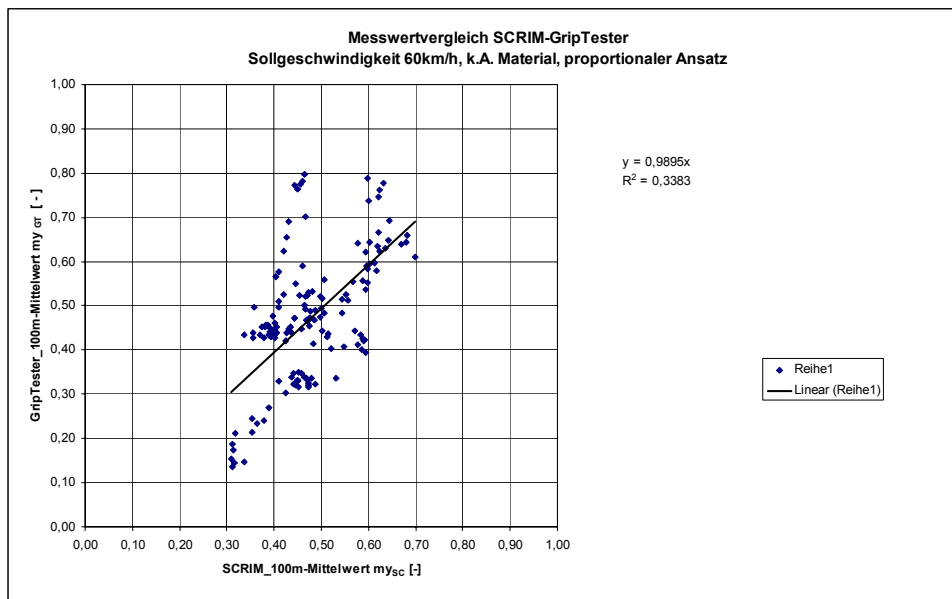


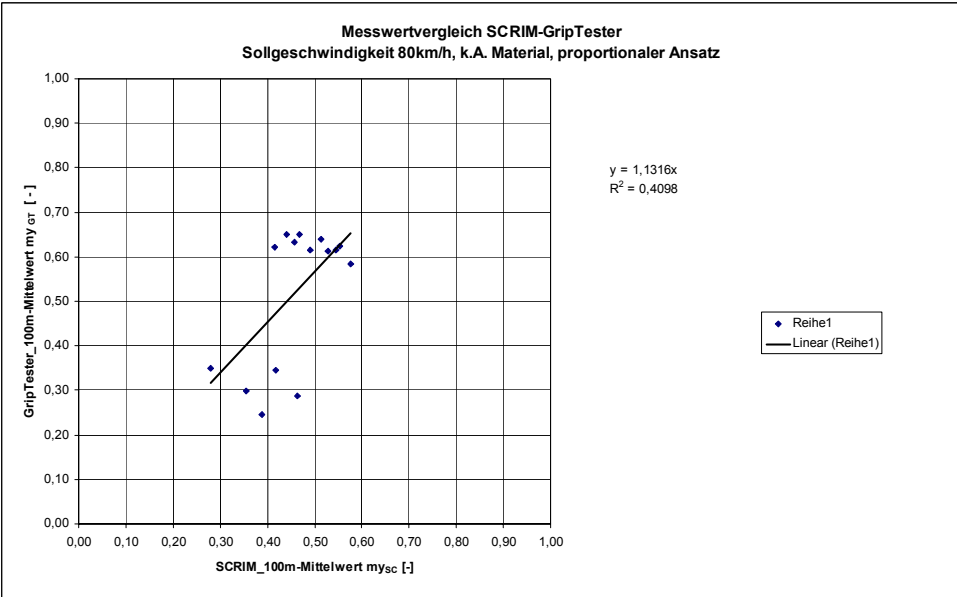
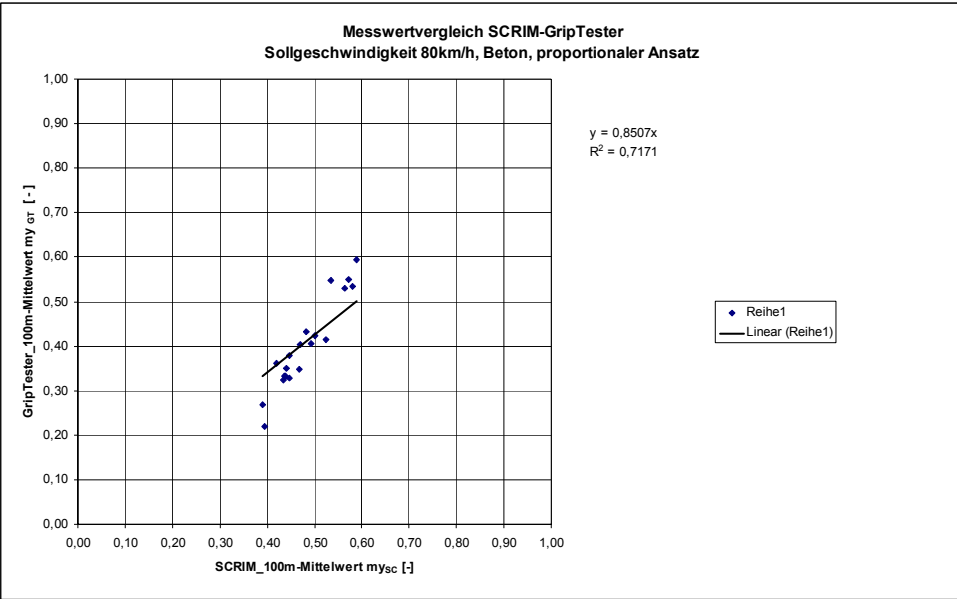


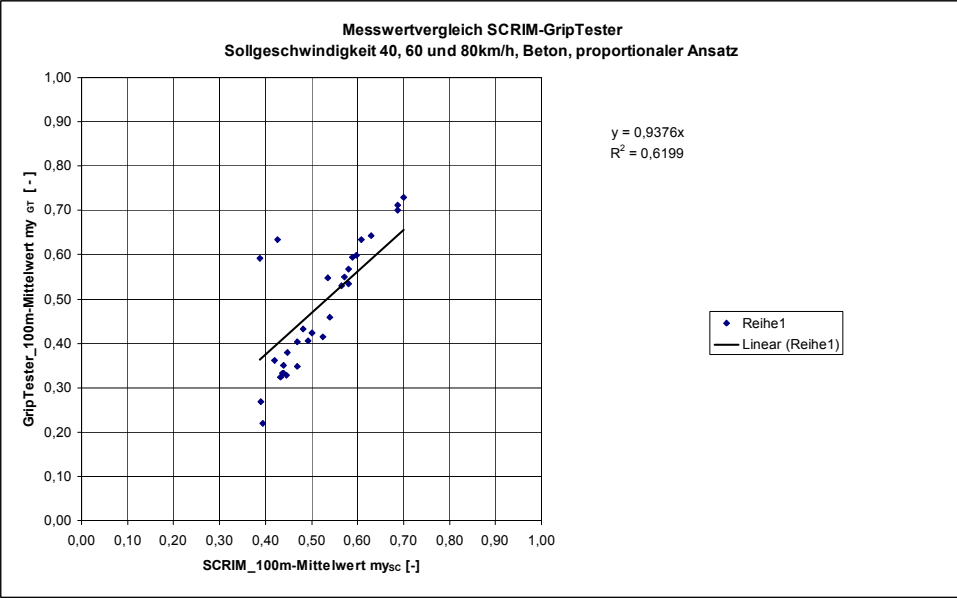
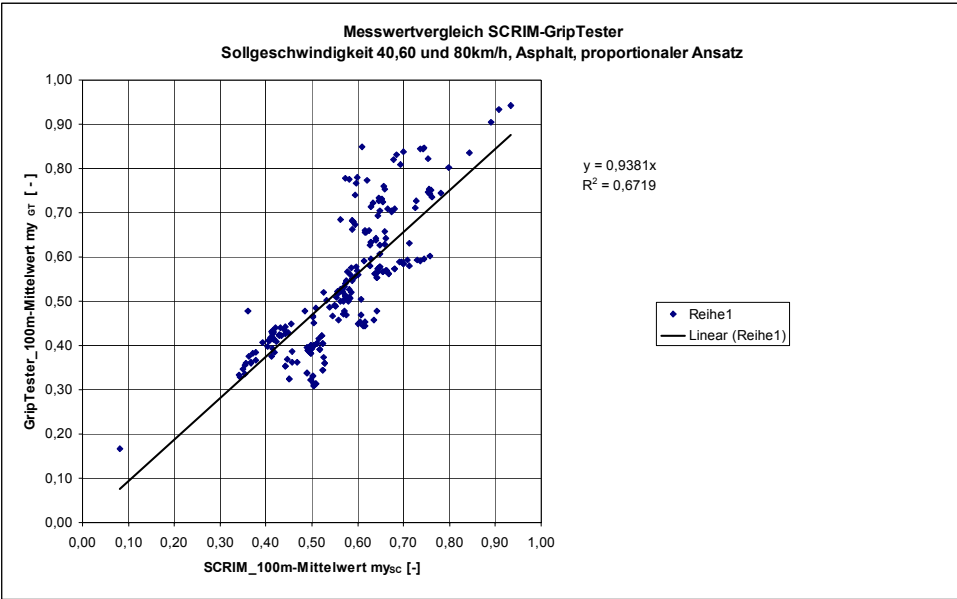
Anlage A1	100 m-Mittelwertvergleich SCRIM-GripTester Proportionaler Regressionsansatz für unterschiedliche Gruppen von Daten unter Variation der Sollmessgeschwindigkeit und Deckschichtmaterials	Blatt 2
-----------	---	---------

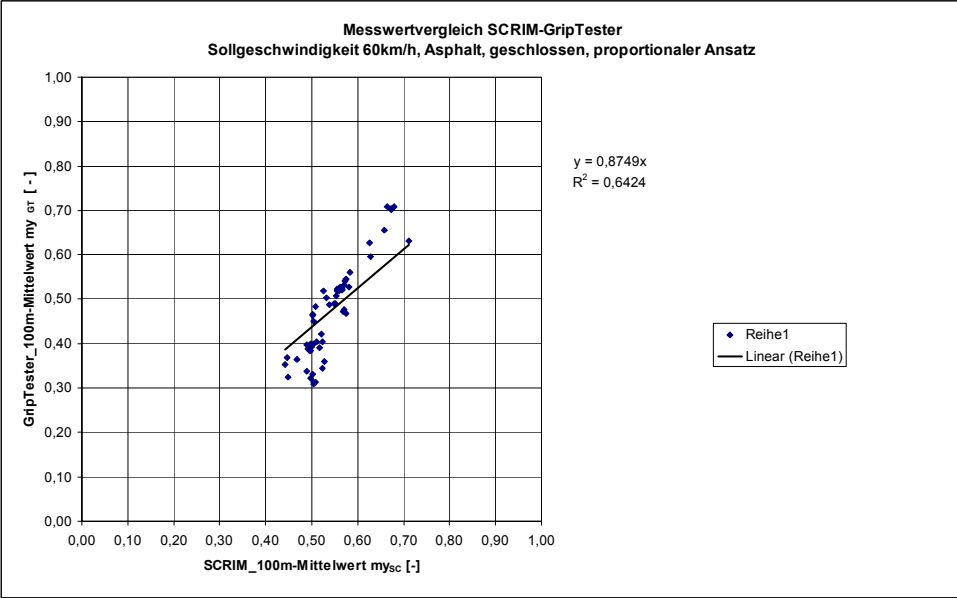
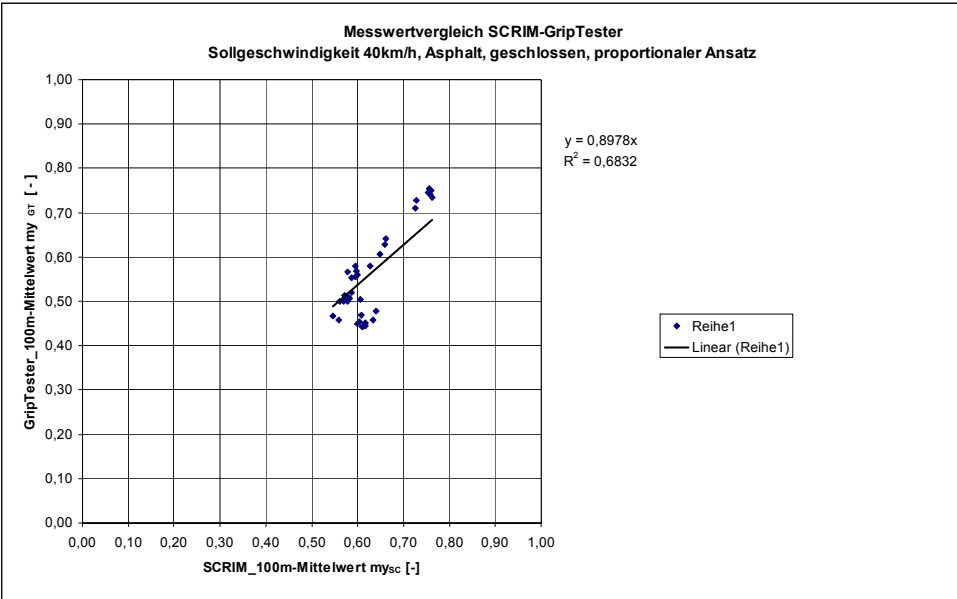


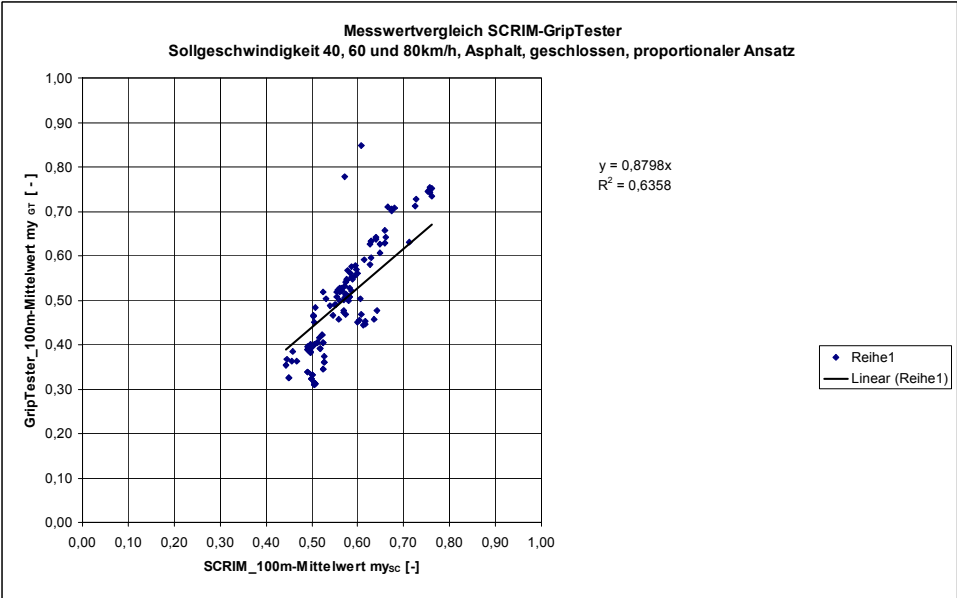
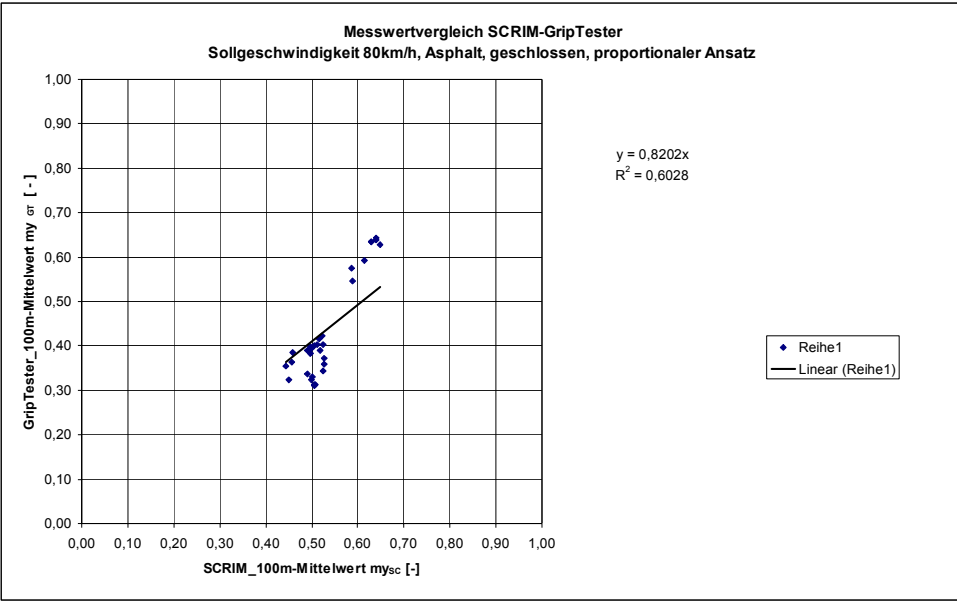


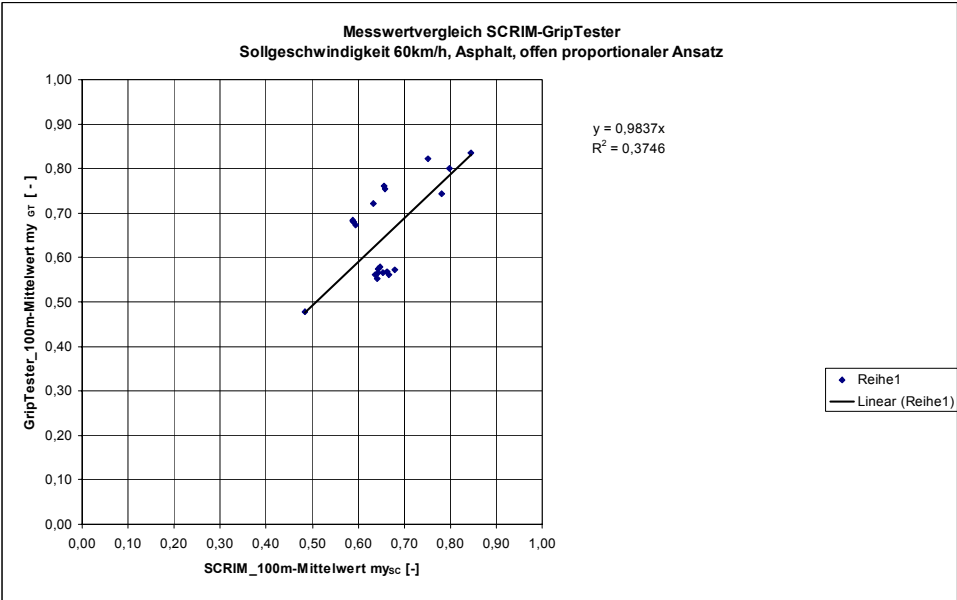
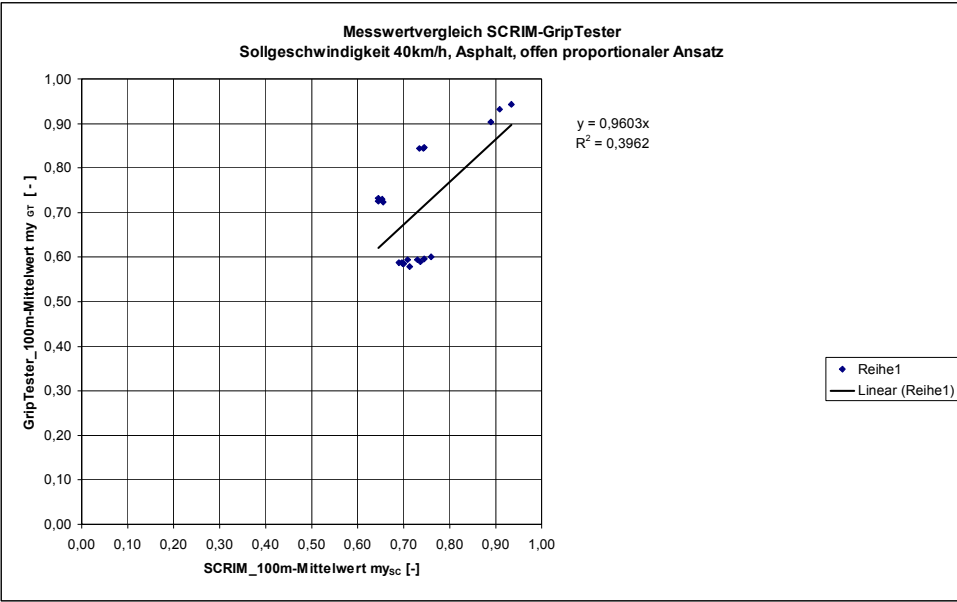


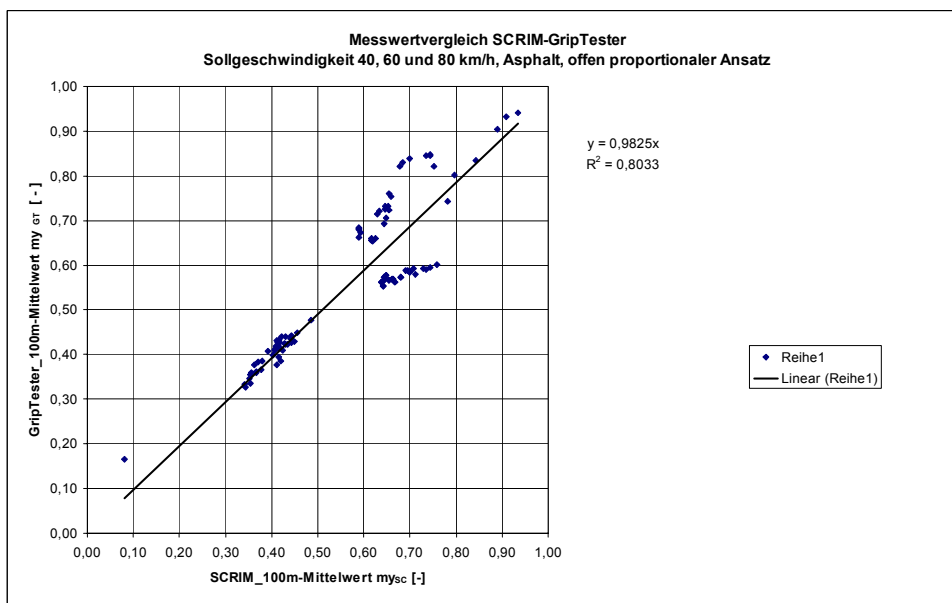
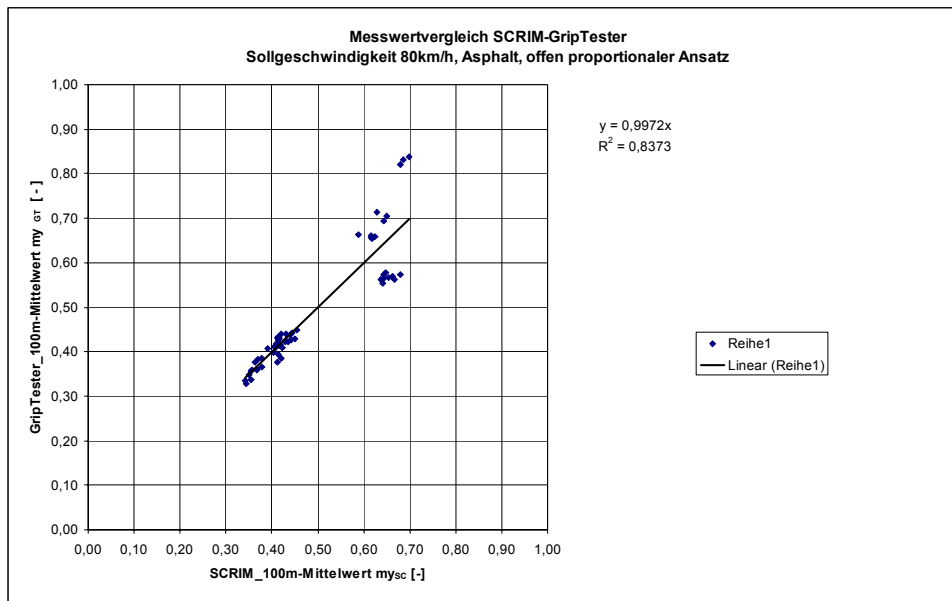


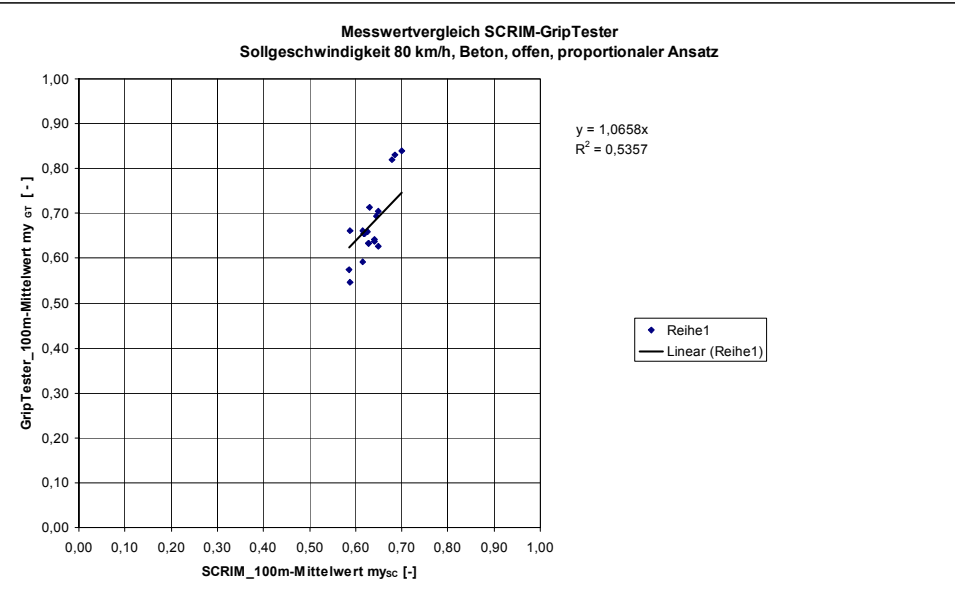
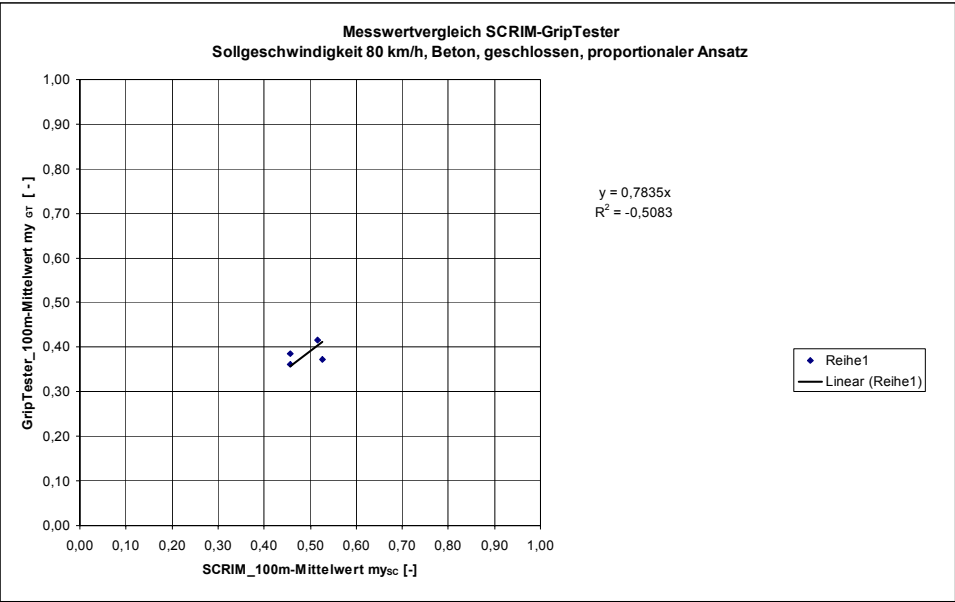


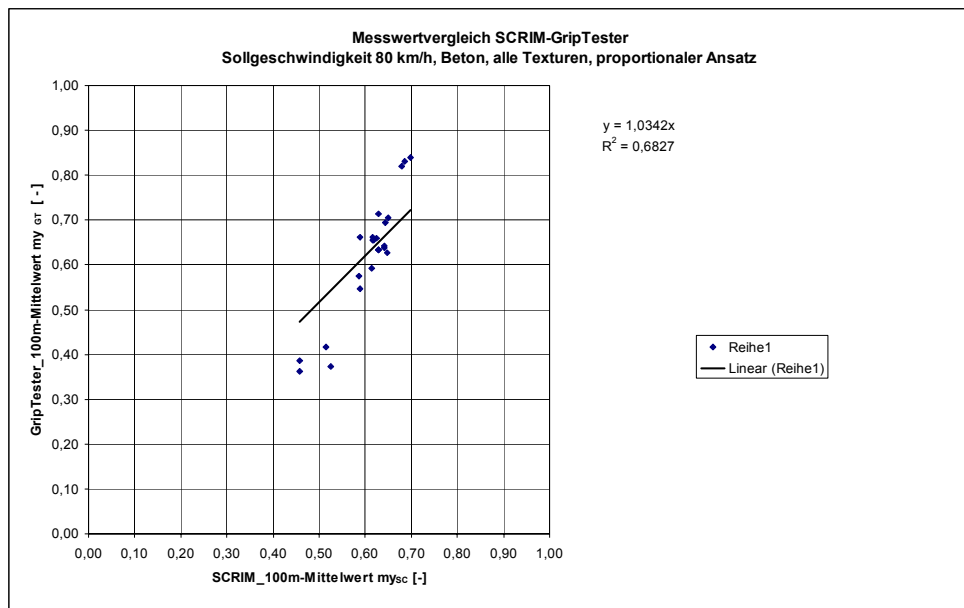


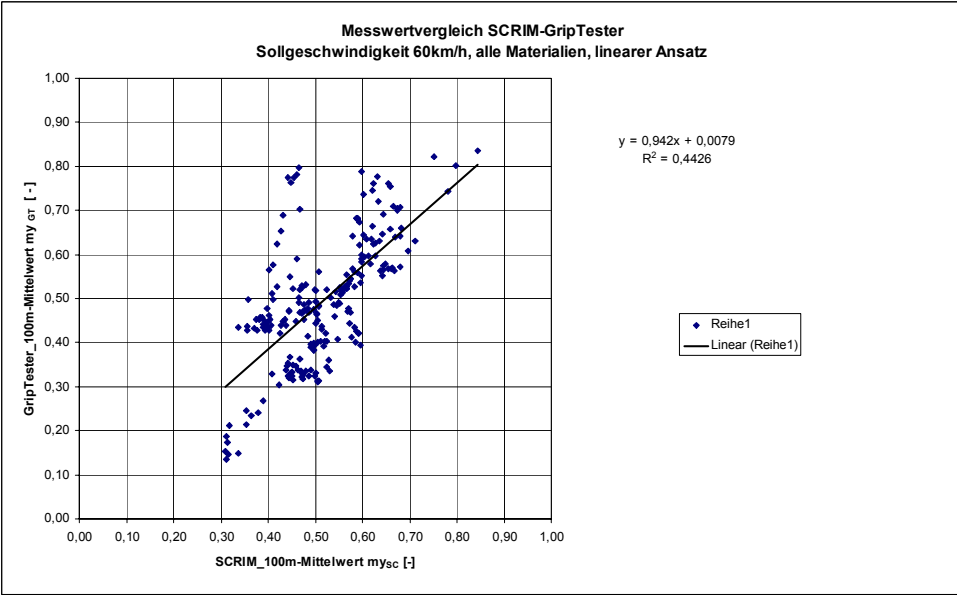
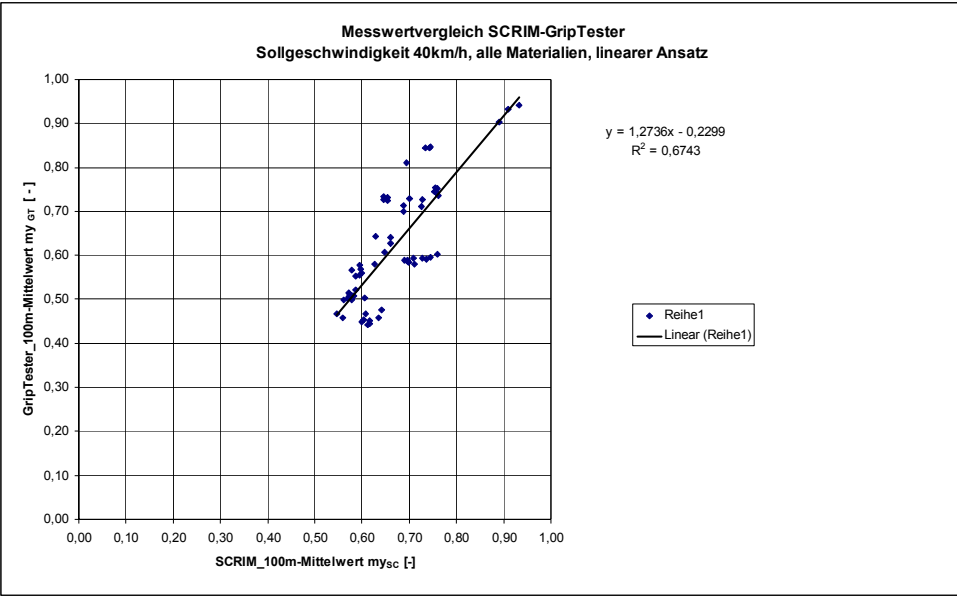


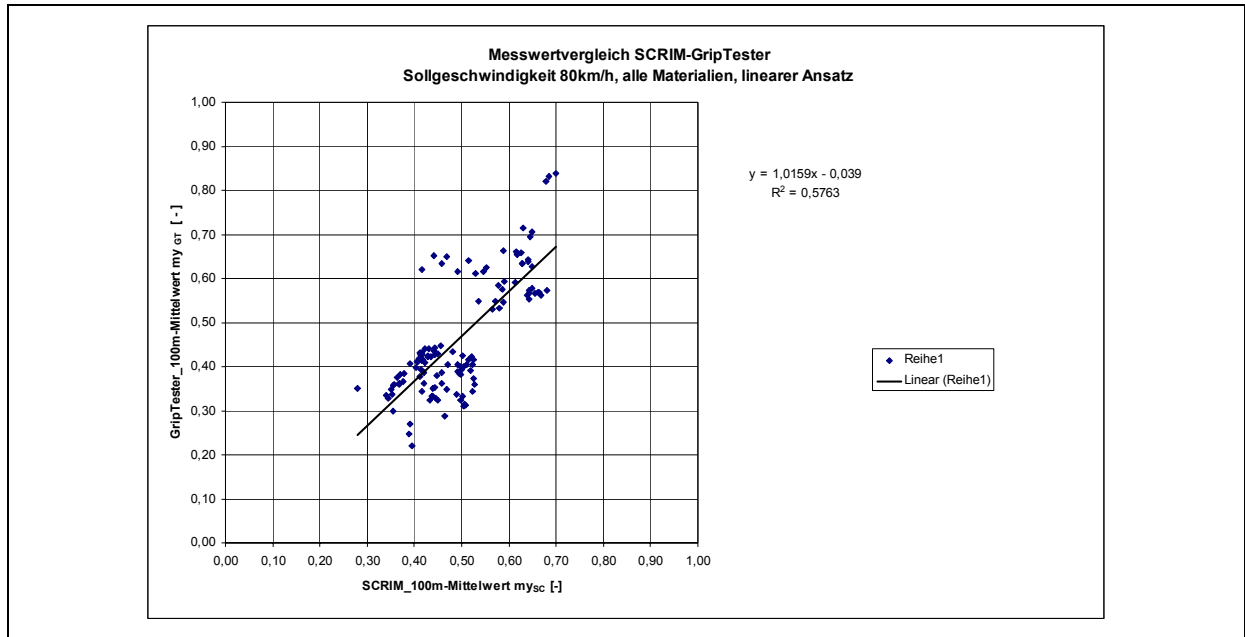


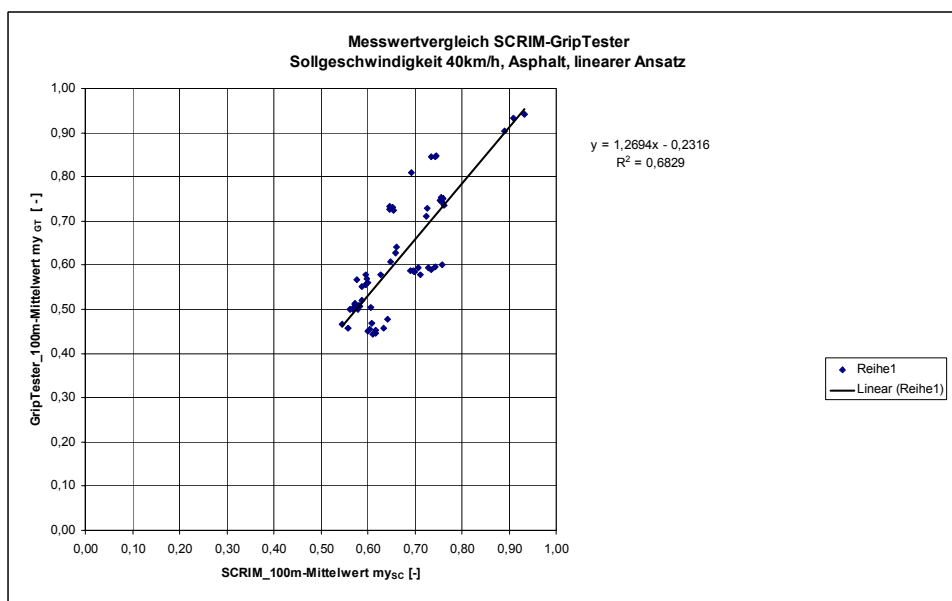
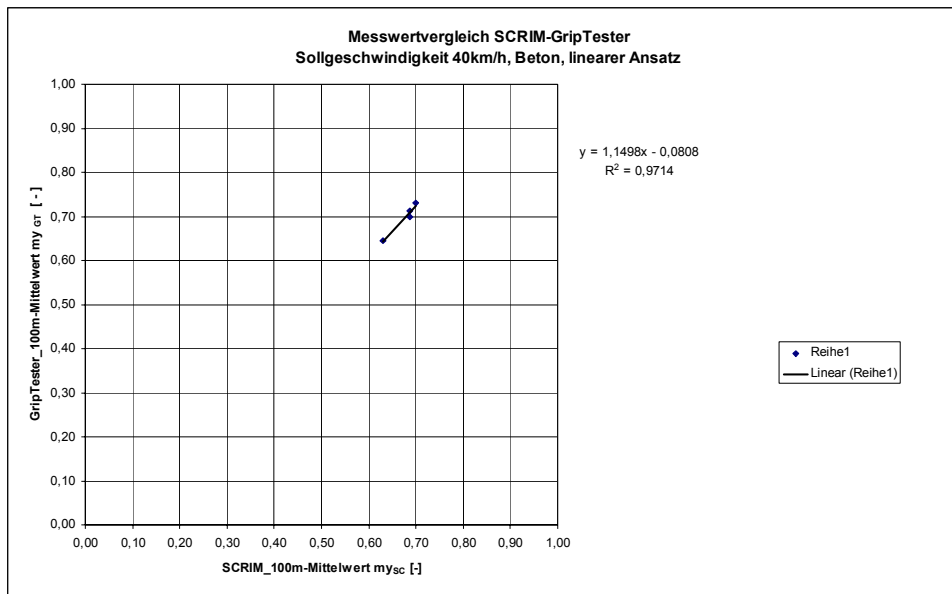


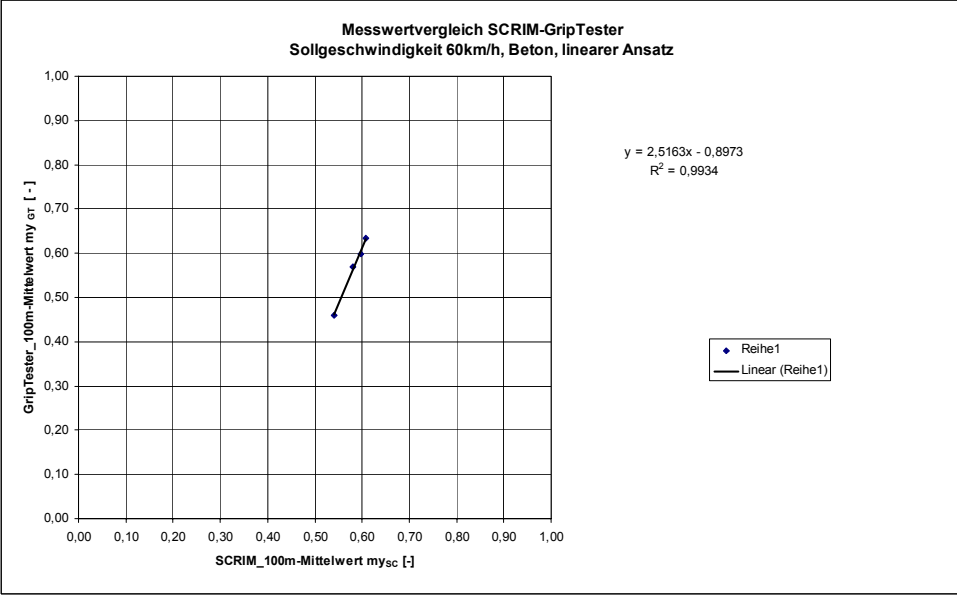
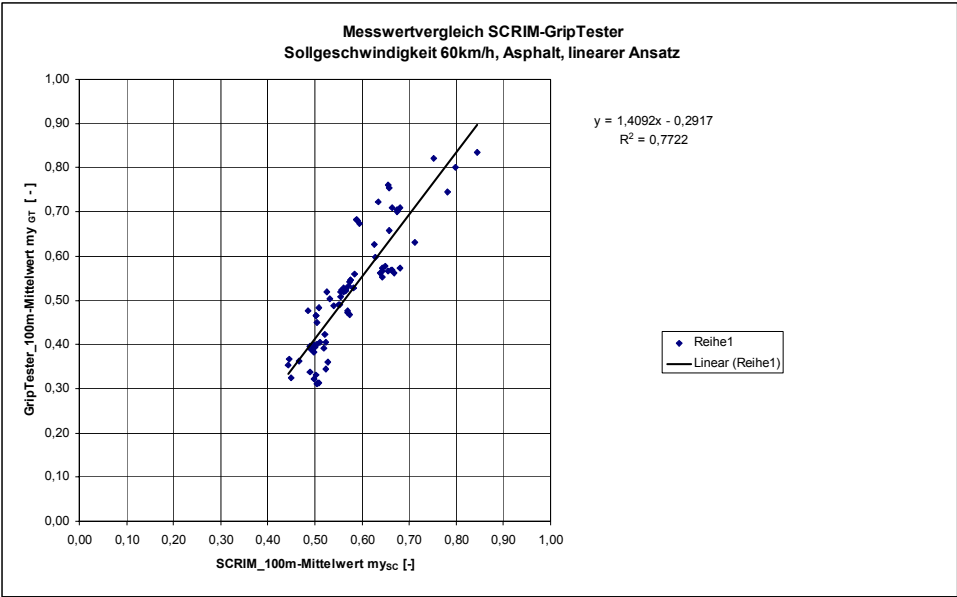


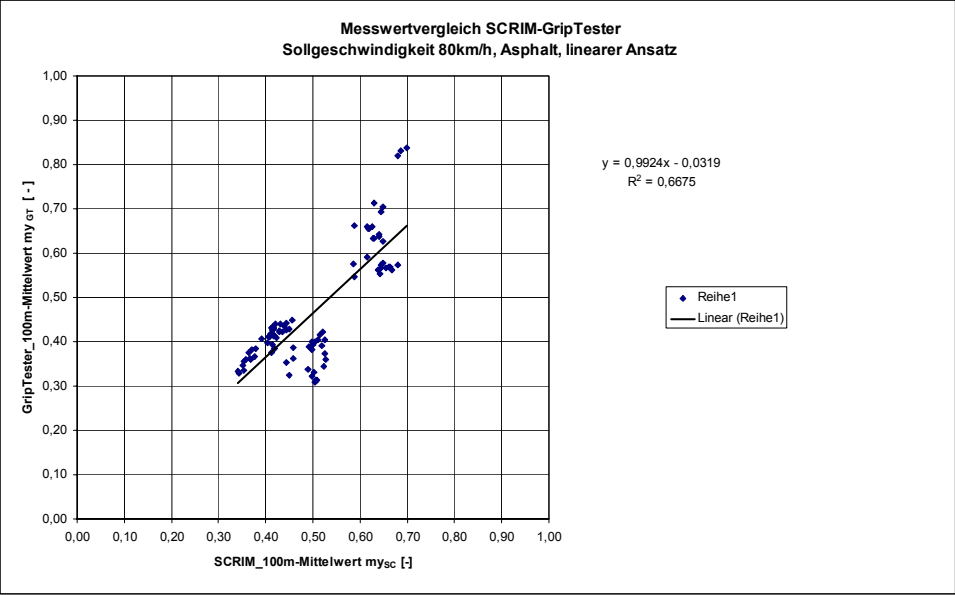
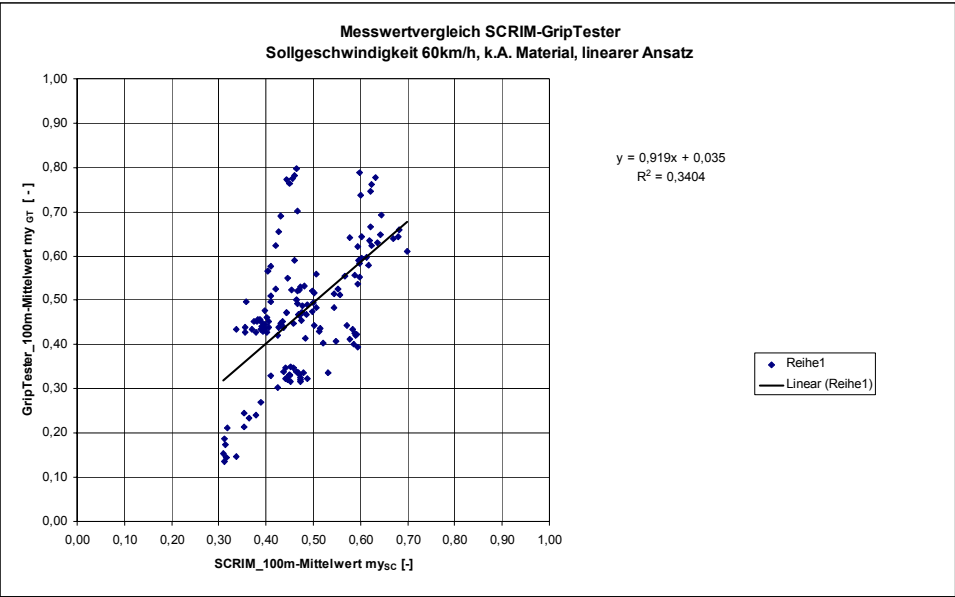


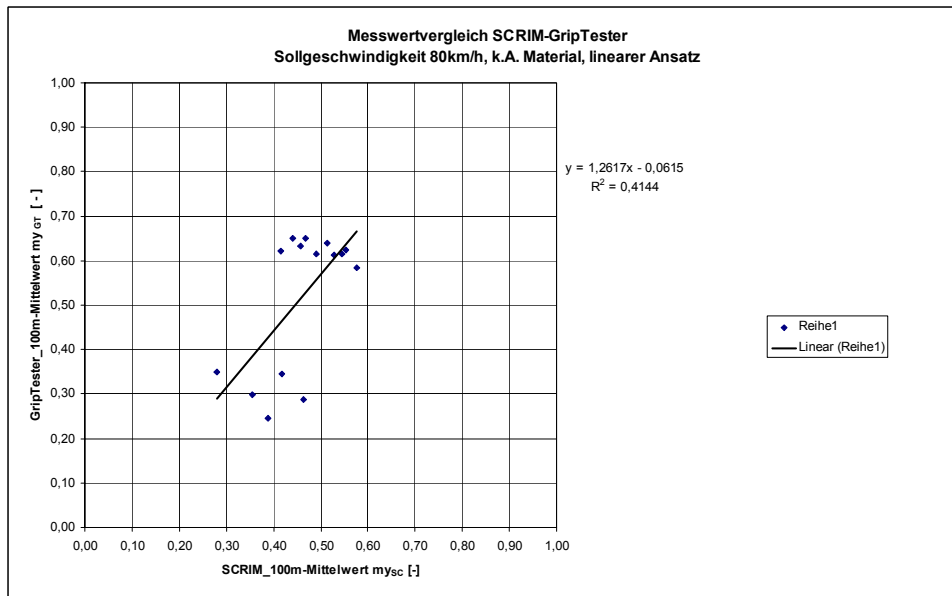
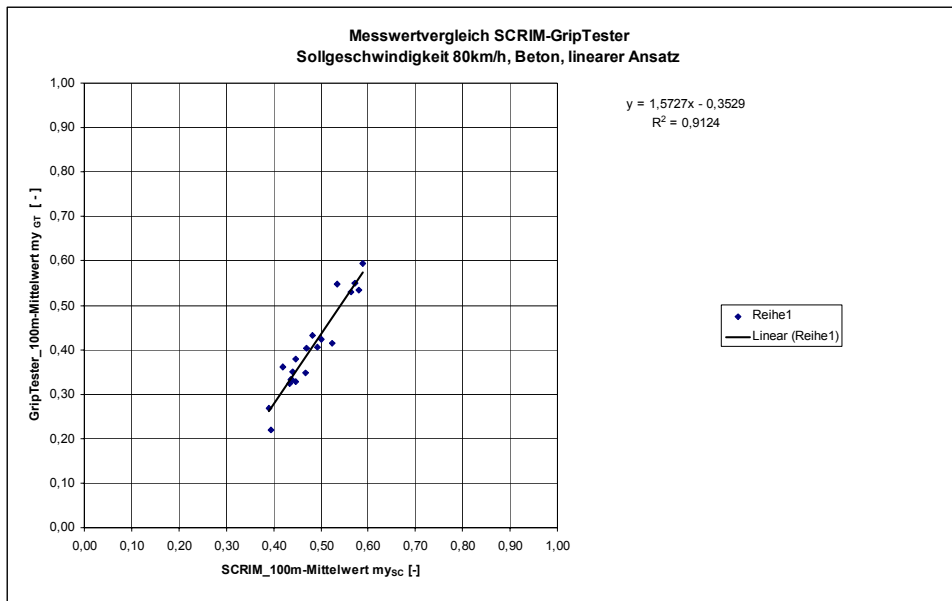




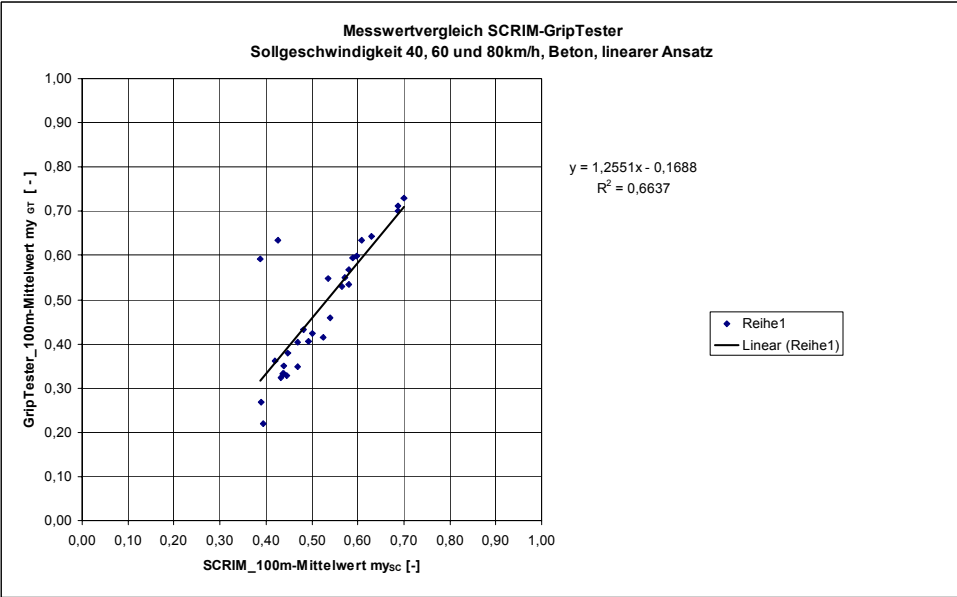
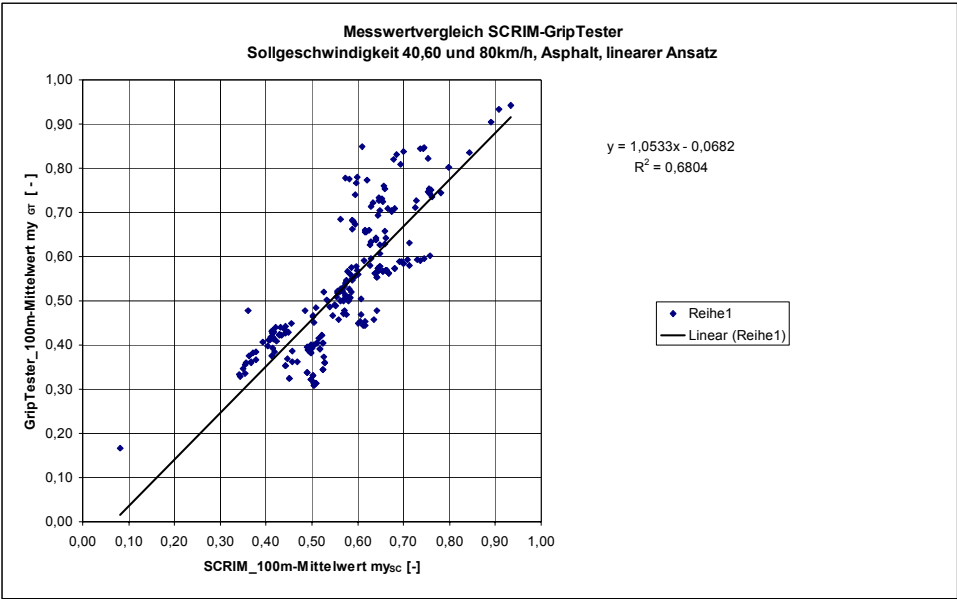


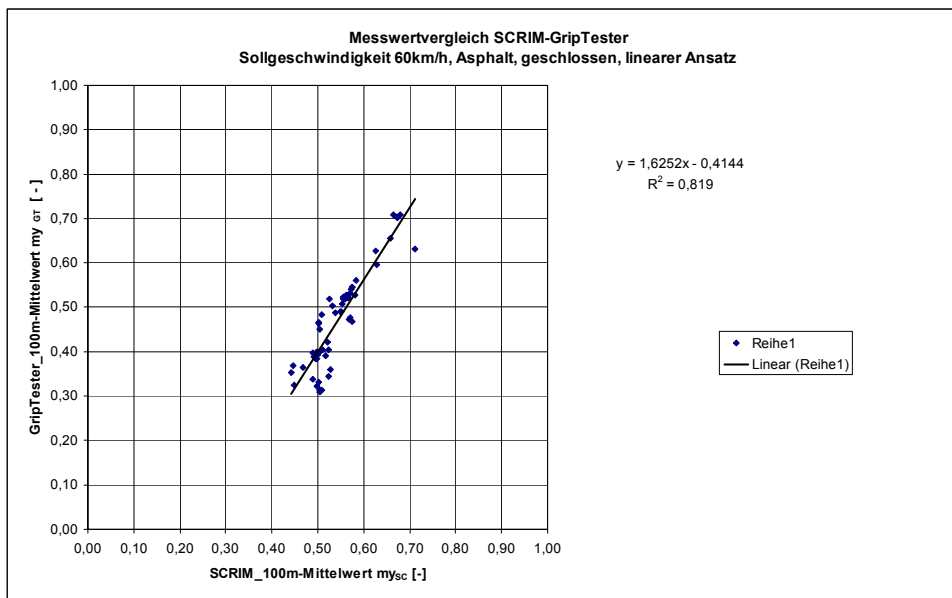
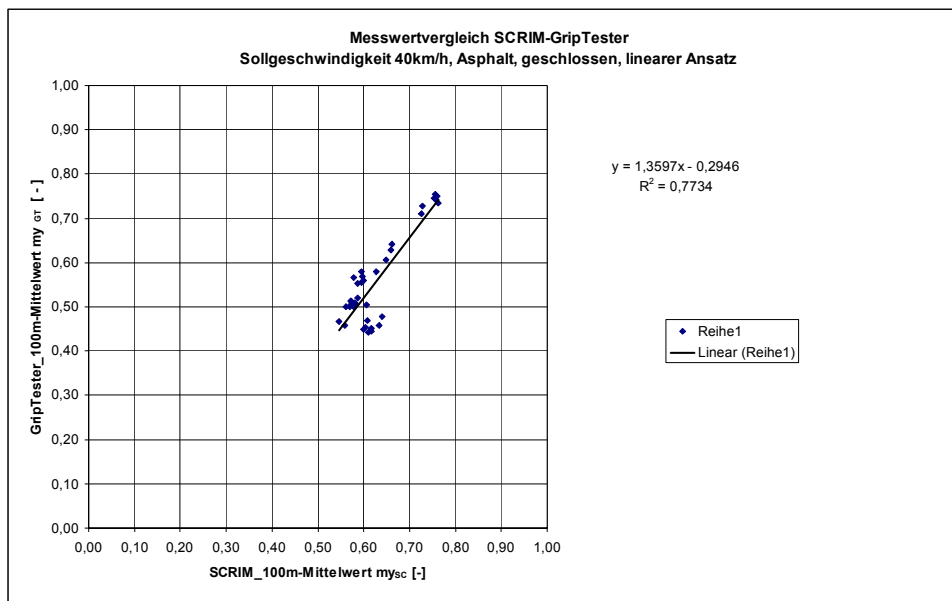


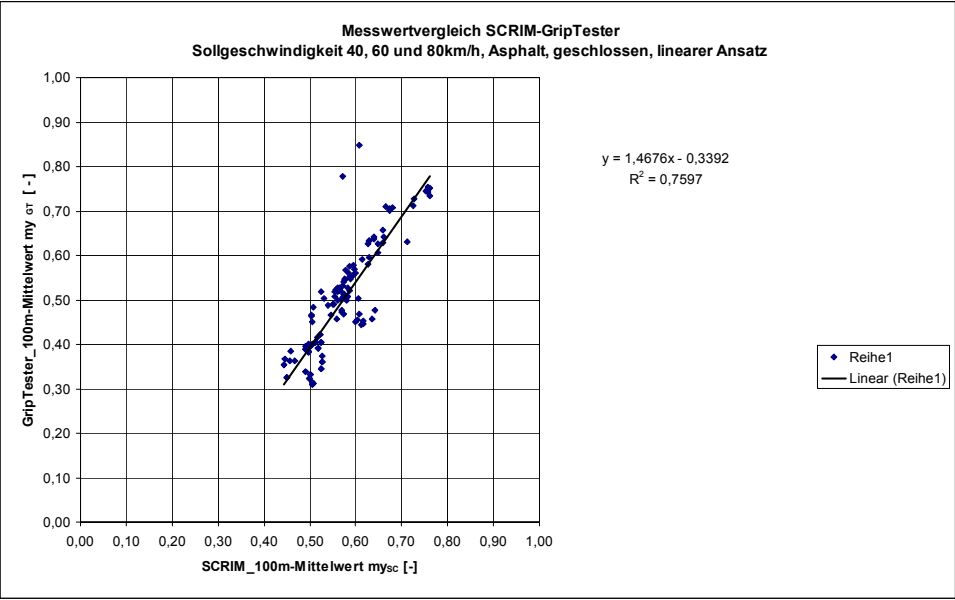
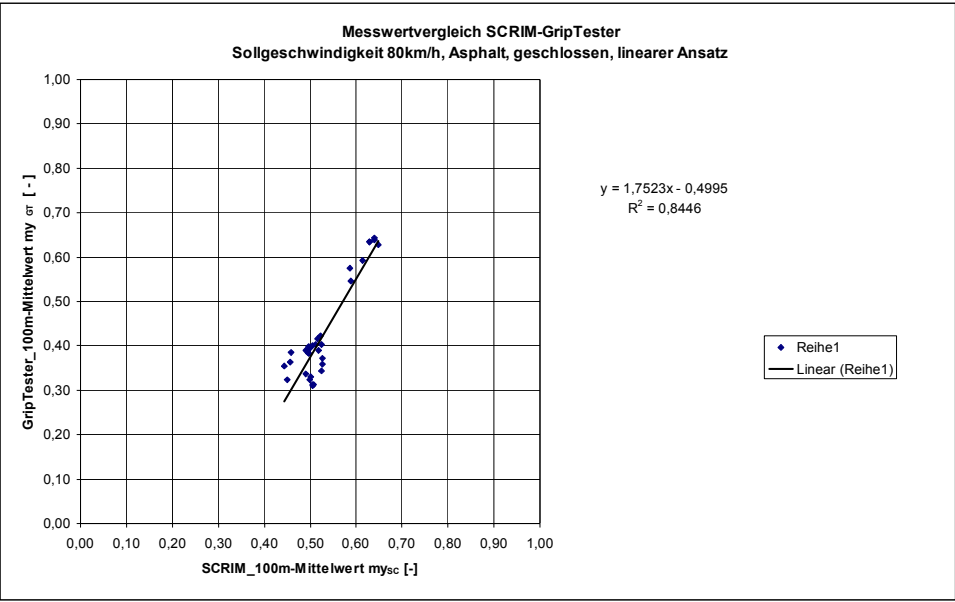


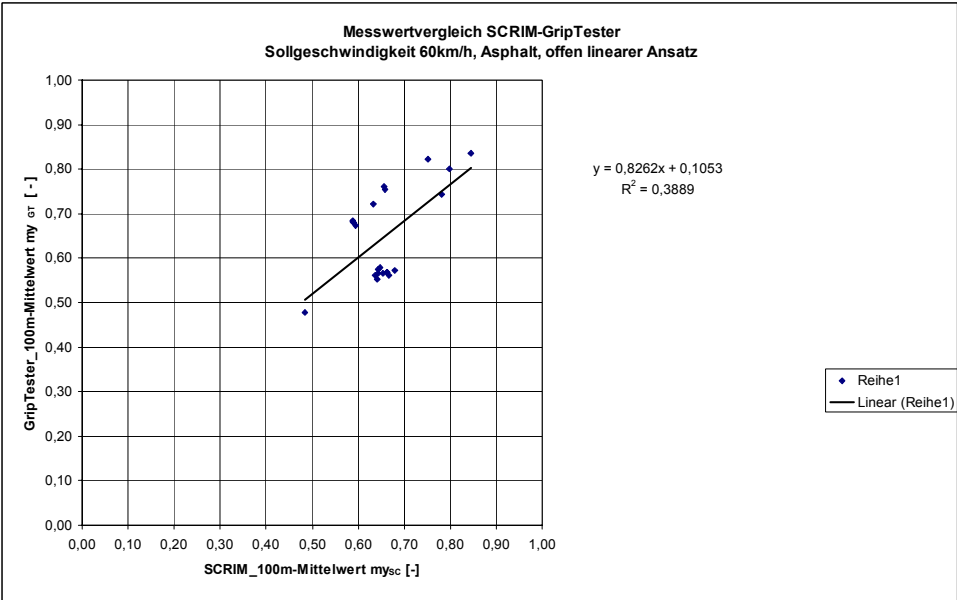
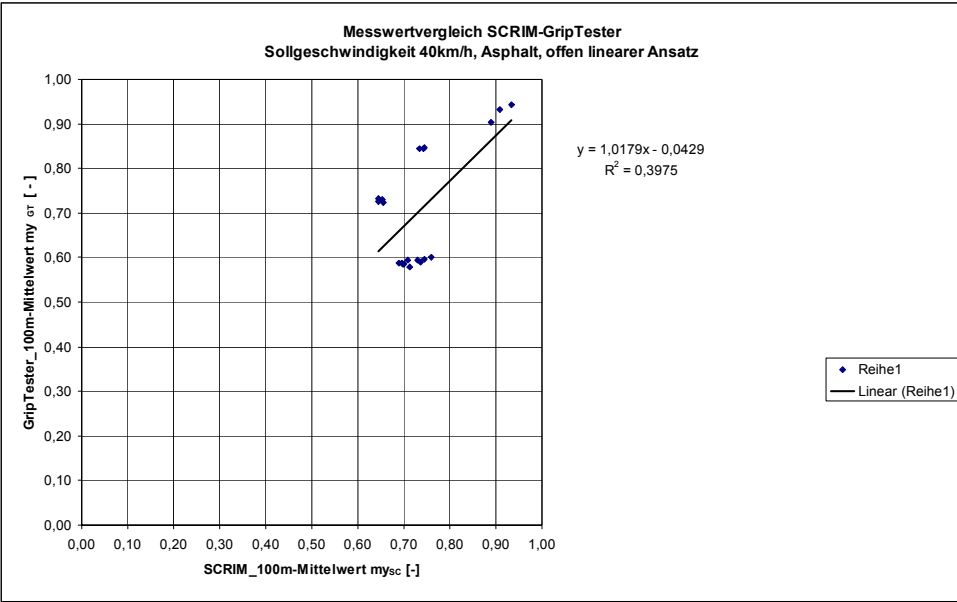


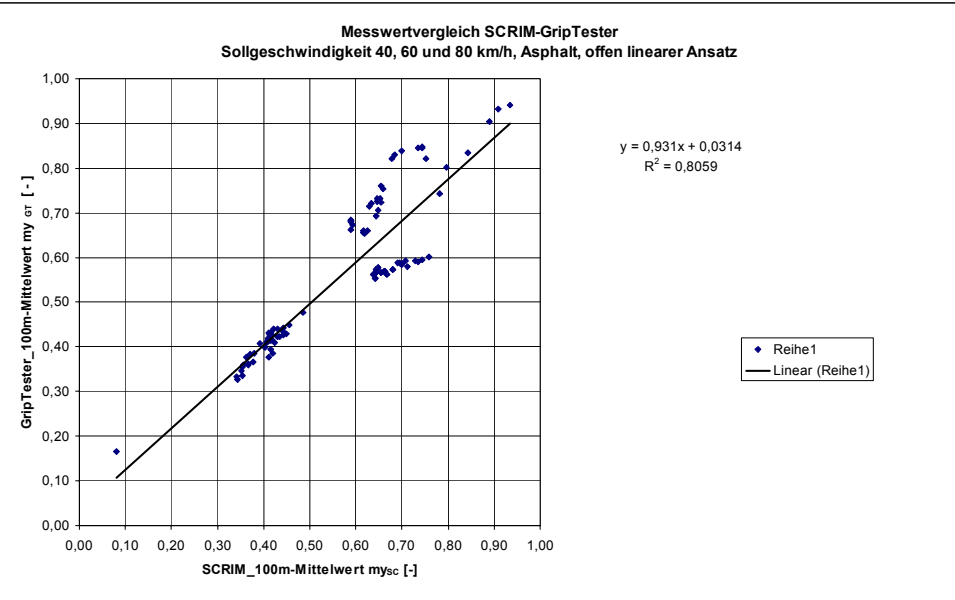
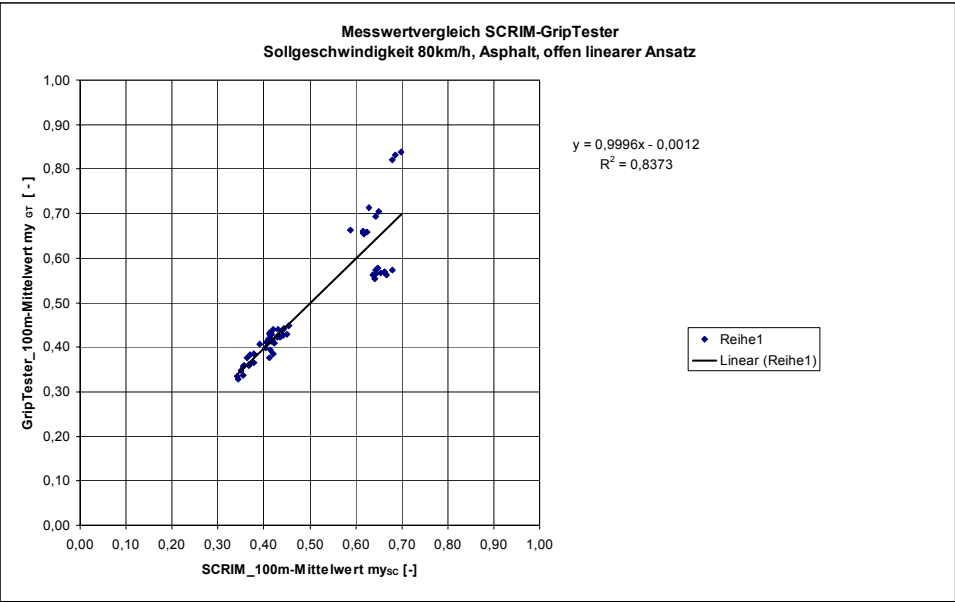
Anlage A2	100 m-Mittelwertvergleich SCRIM-GripTester Linearer Regressionsansatz für unterschiedliche Gruppen von Daten, Variation der Sollmessgeschwindigkeit und des Deckschichtmaterials	Blatt 19
-----------	---	----------

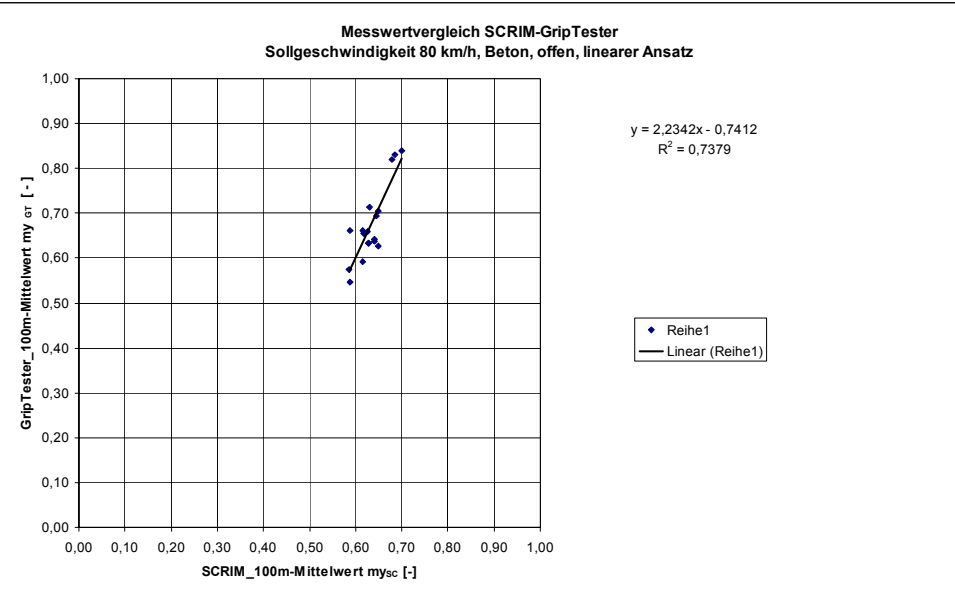
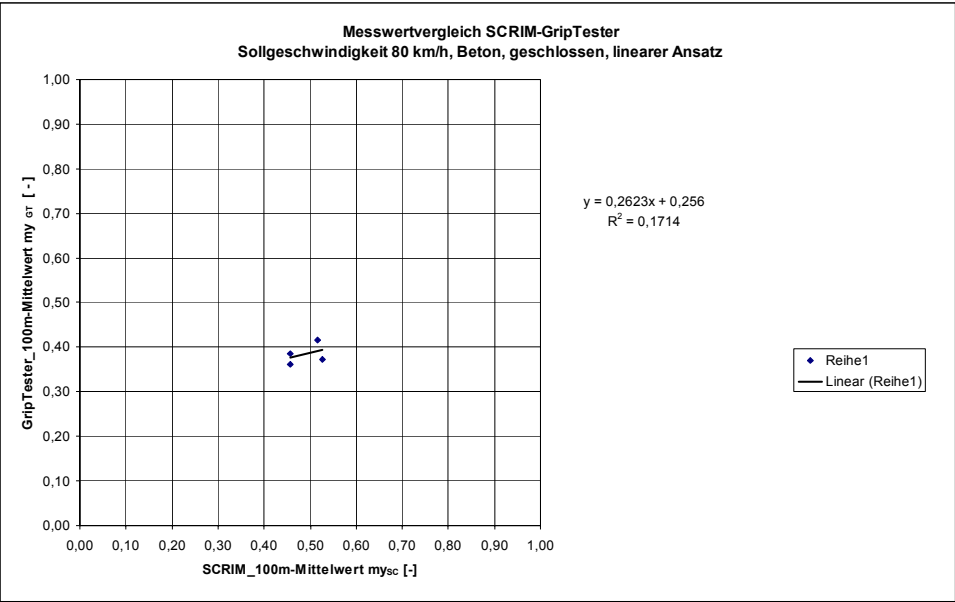


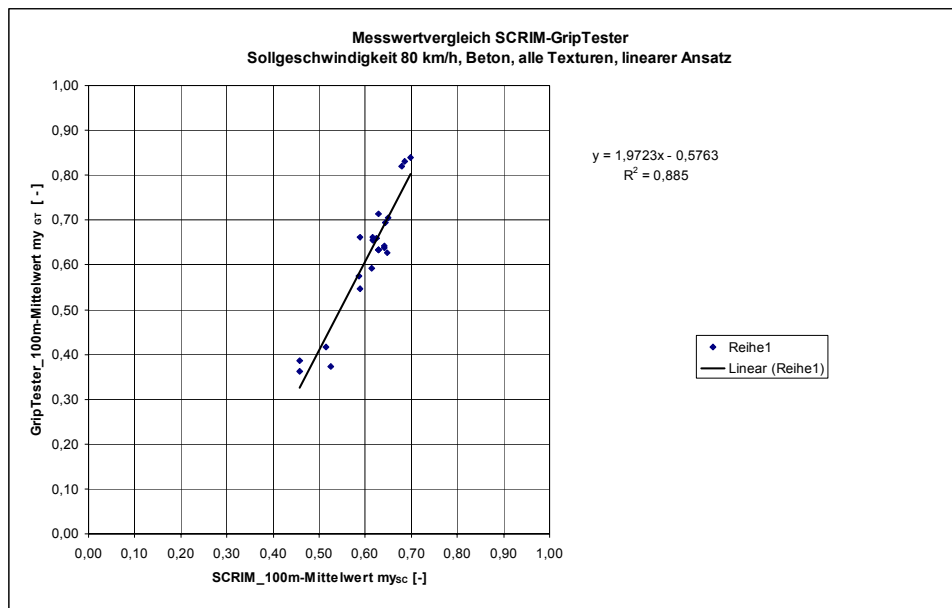


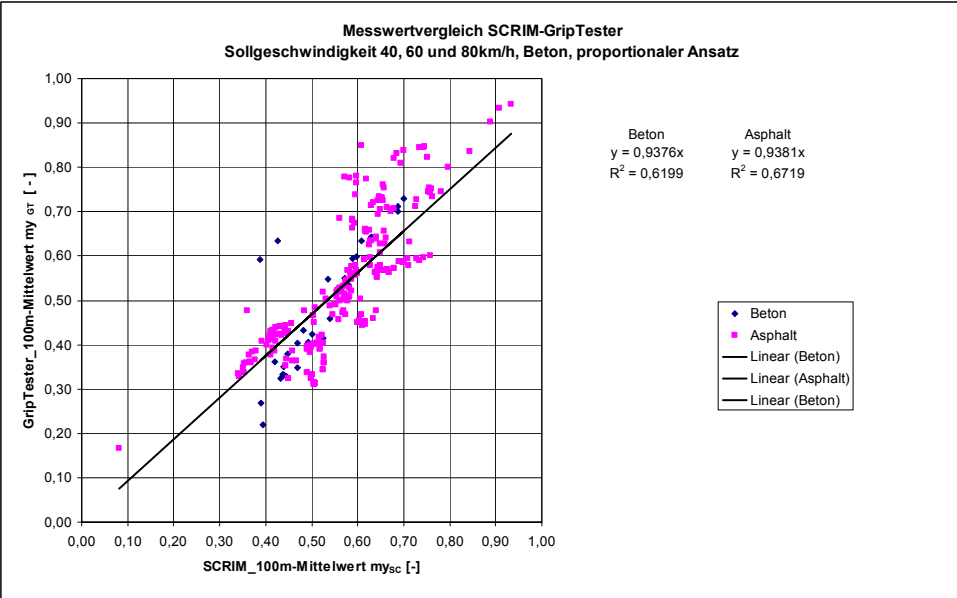
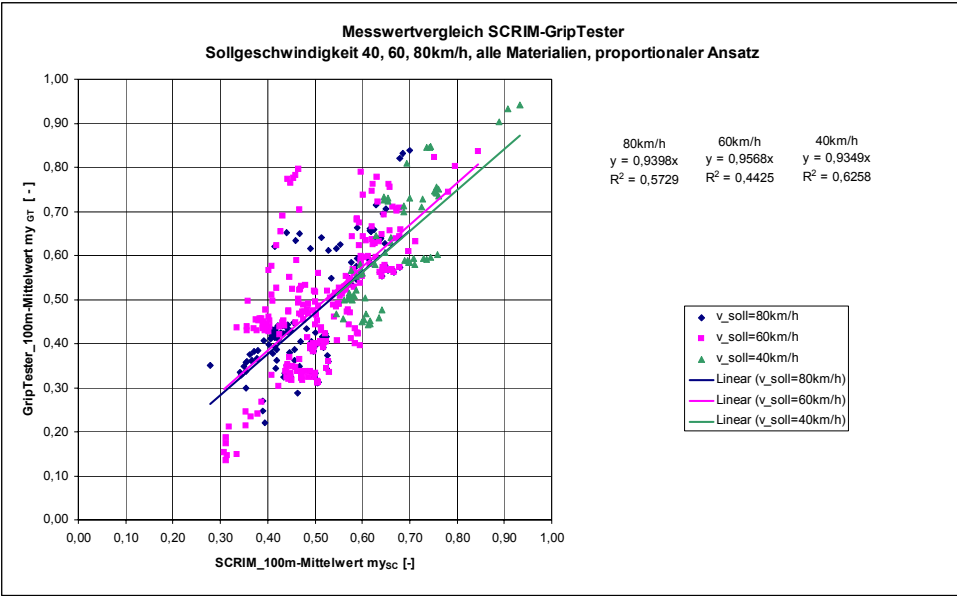


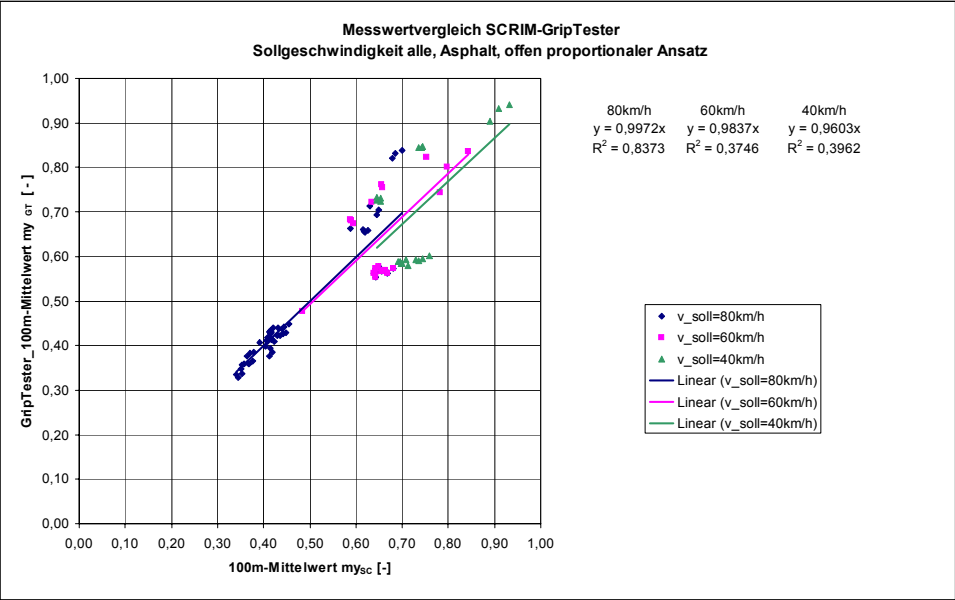
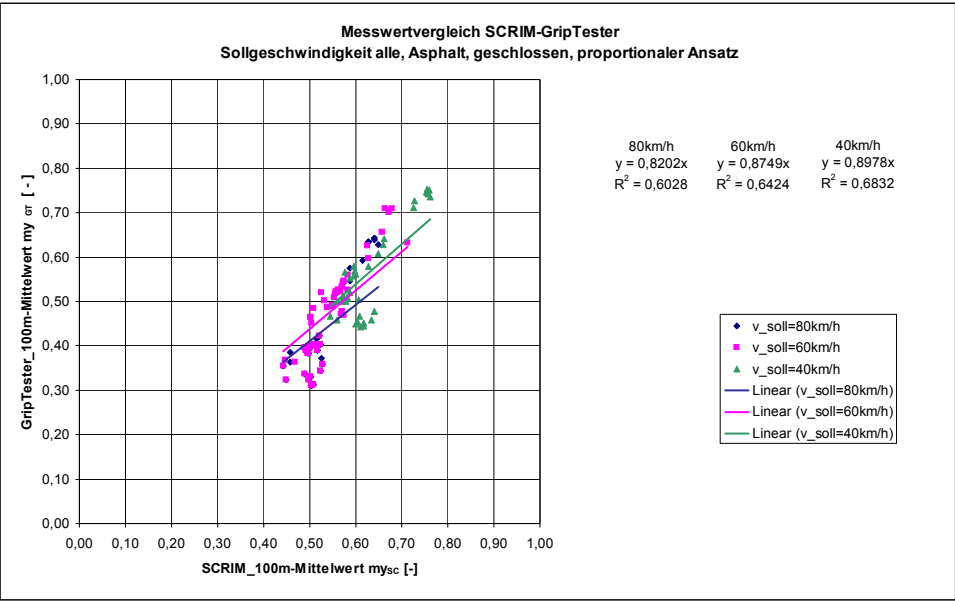


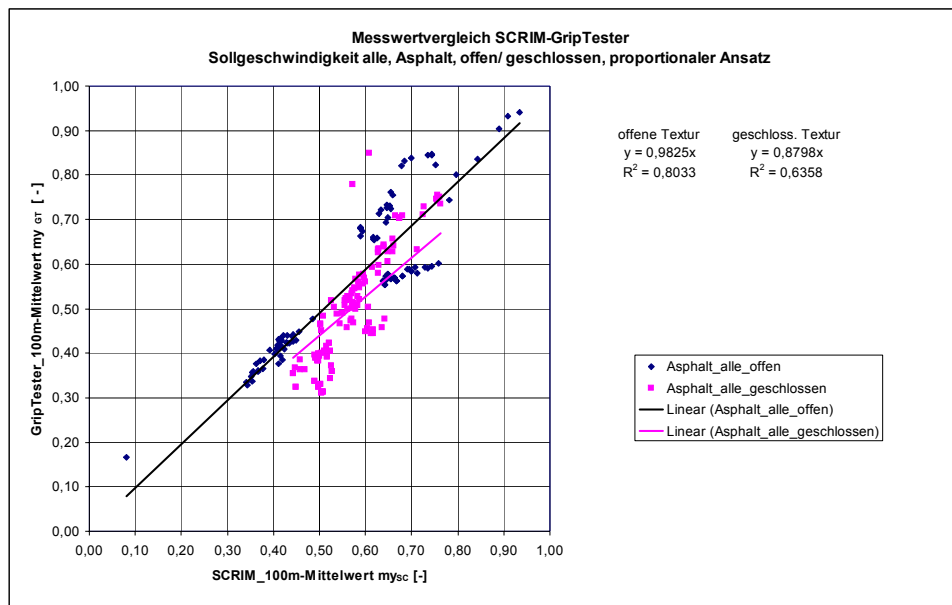


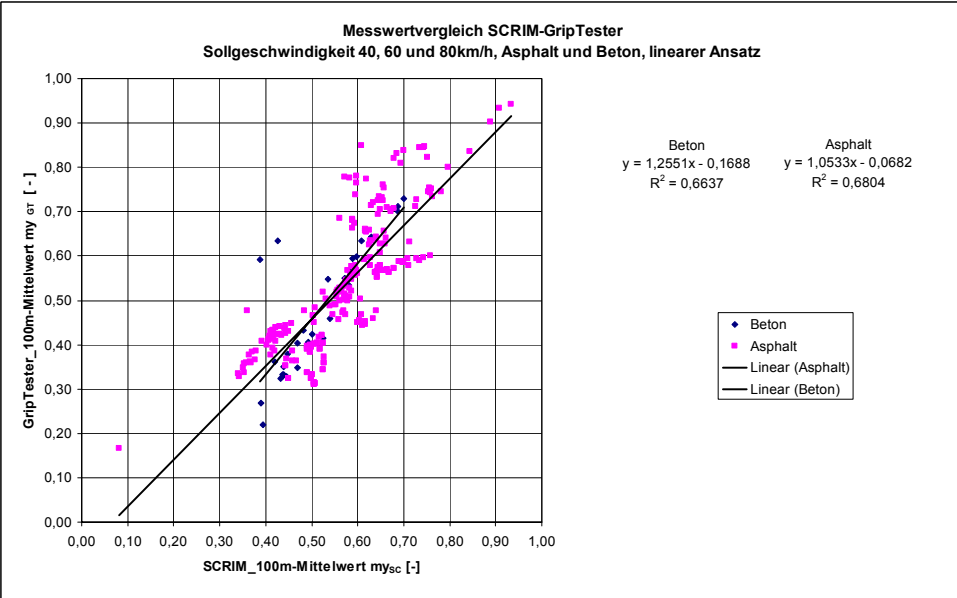
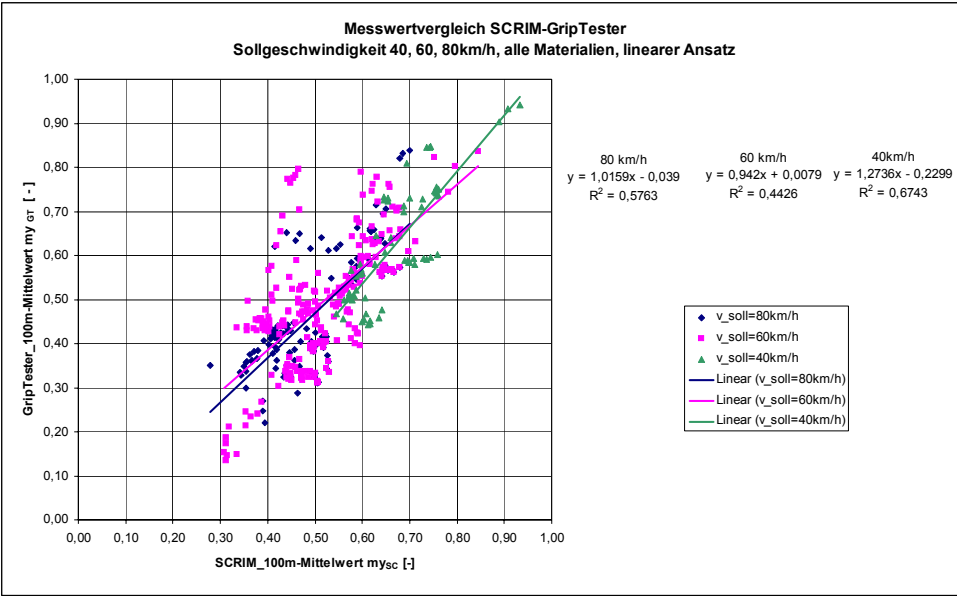


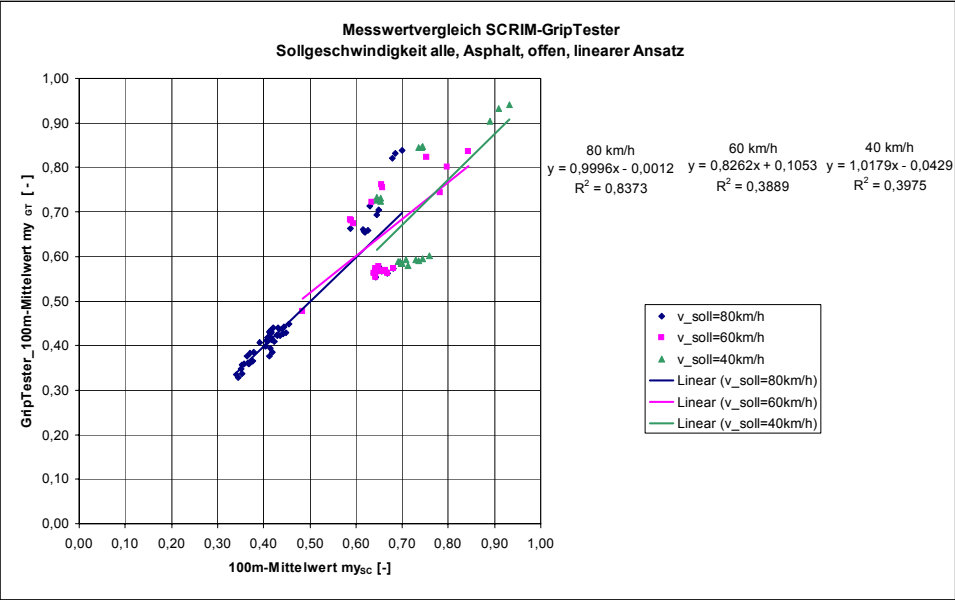
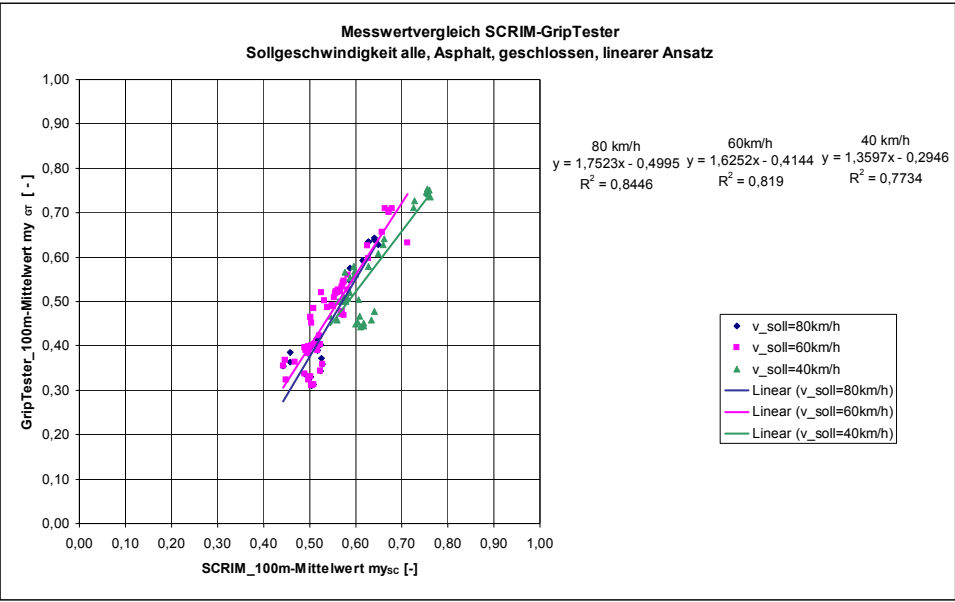


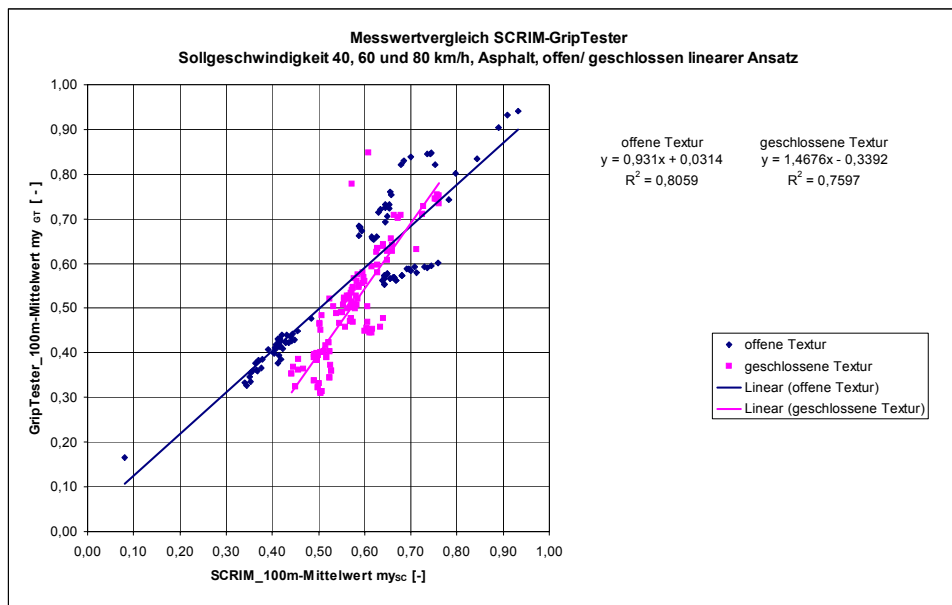


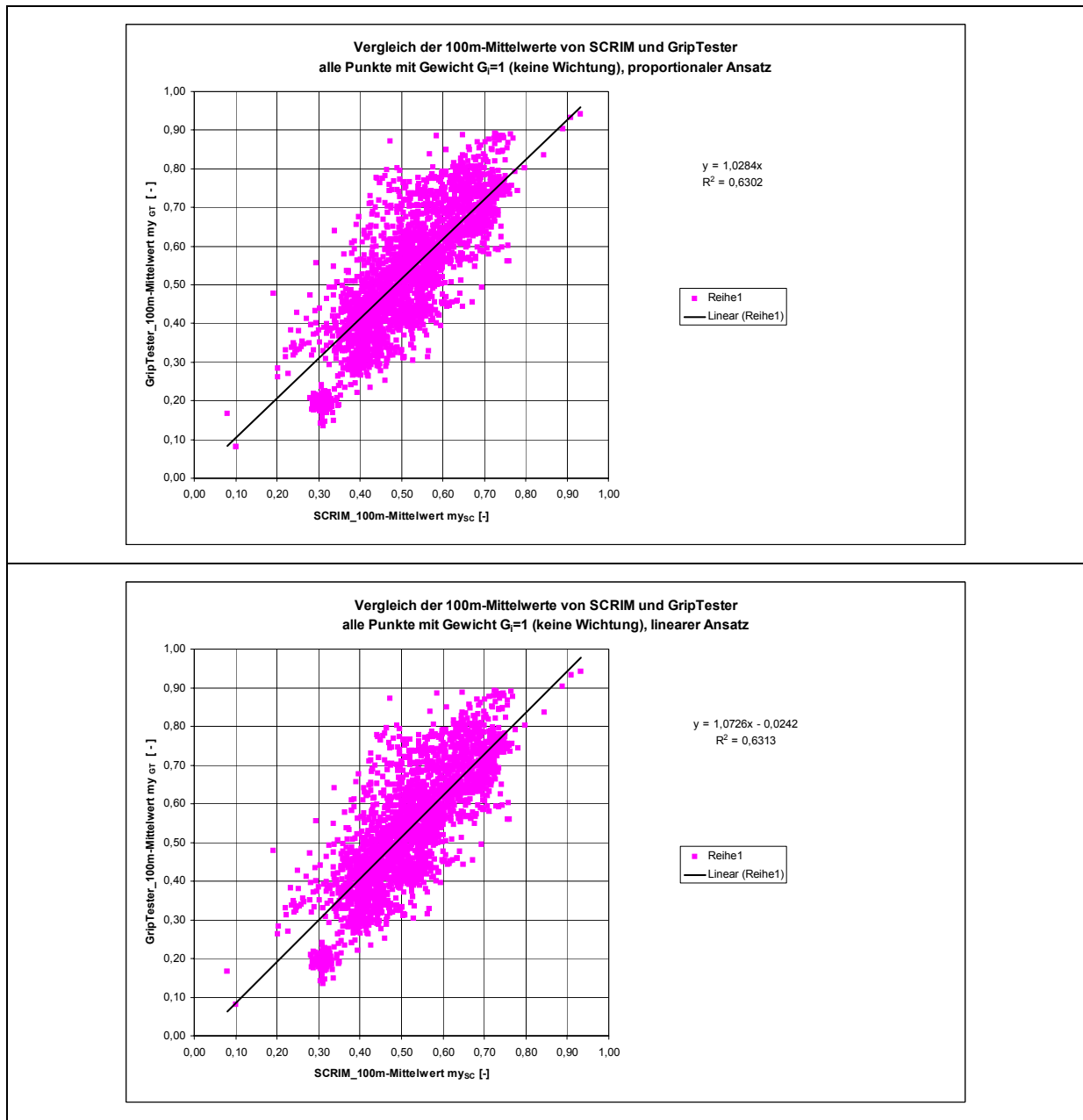


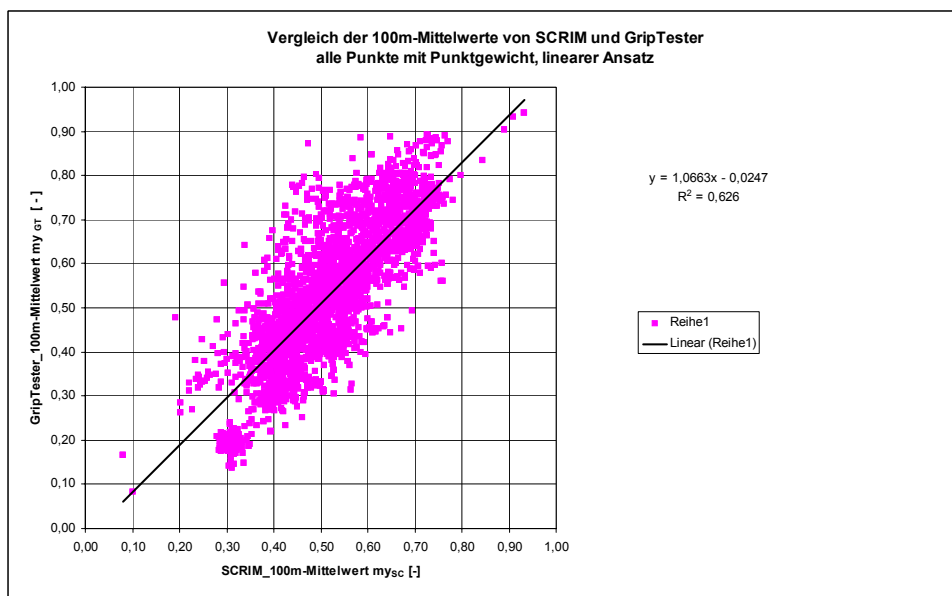
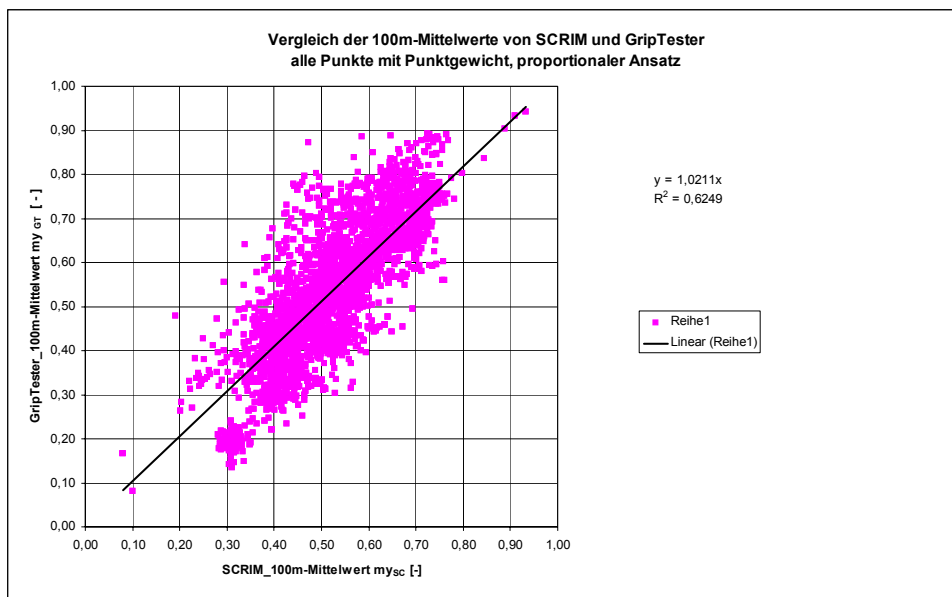




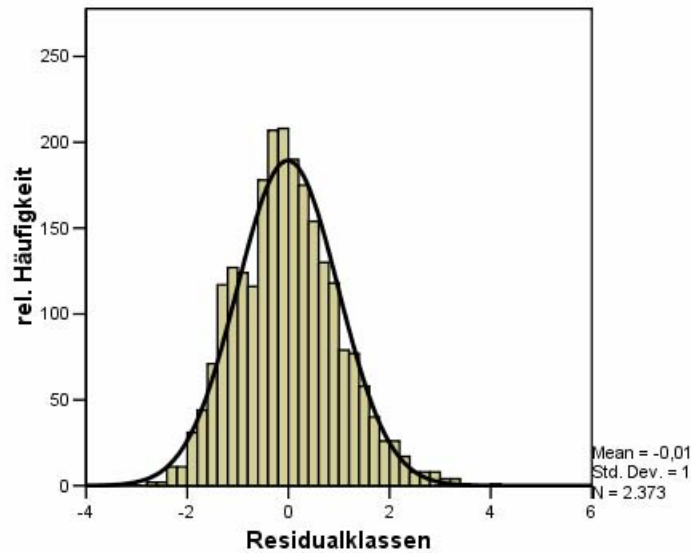






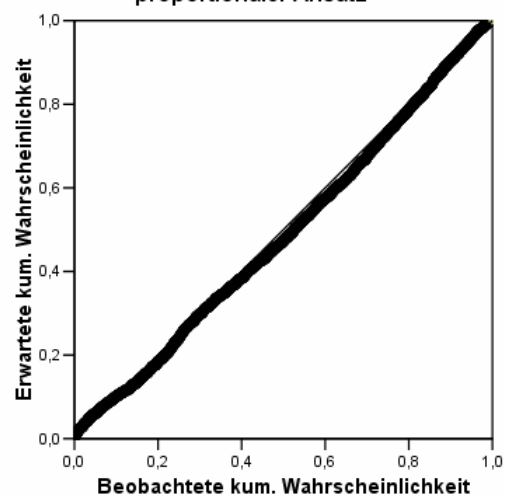


Häufigkeit der Residuen 100m-Vergleich SCRIM-GripTester,
ohne Wichtung, proportionaler Ansatz

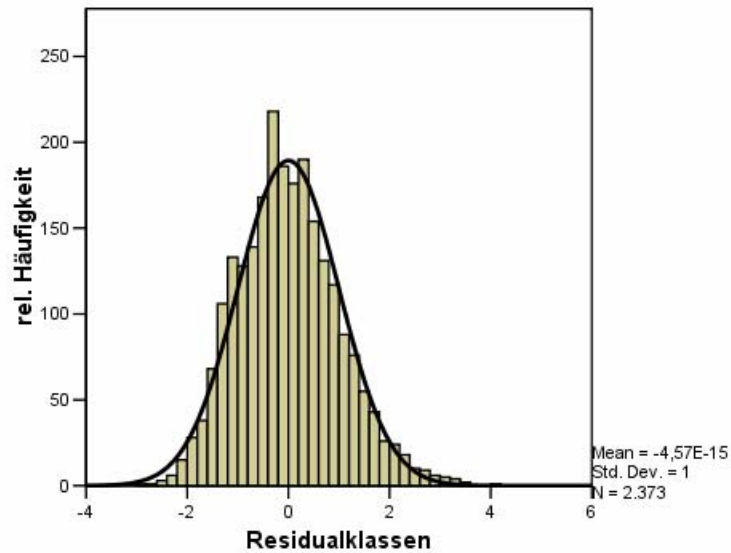


Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual

100m-Vergleich SCRIM-GripTester, ohne Wichtung,
proportionaler Ansatz

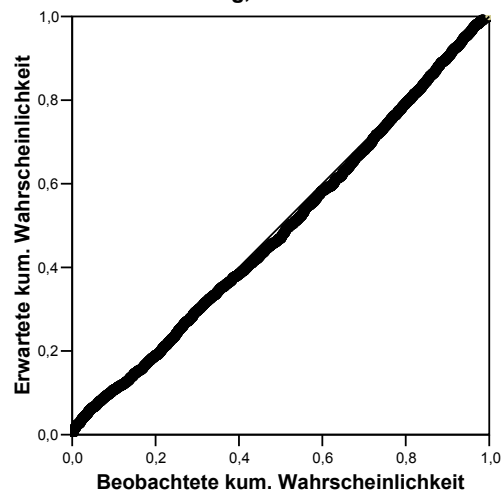


Häufigkeit der Residuen 100m-Vergleich SCRIM-GripTester,
ohne Wichtung, linearer Ansatz

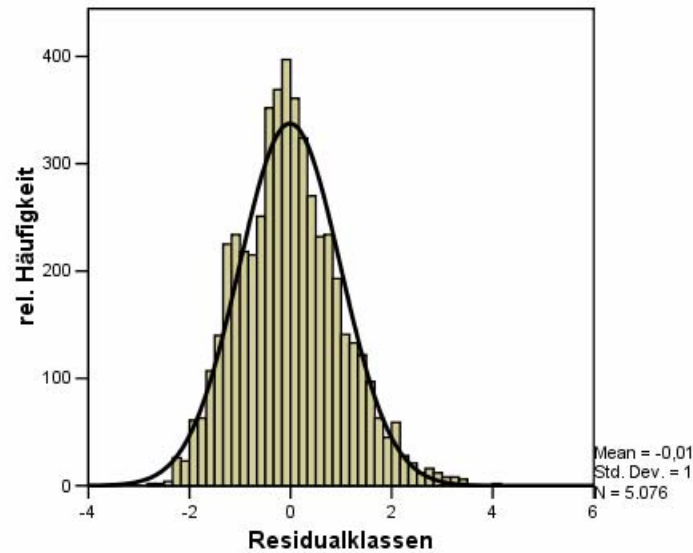


Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual

Häufigkeit der Residuen 100m-Vergleich SCRIM-GripTester,
ohne Wichtung, linearer Ansatz

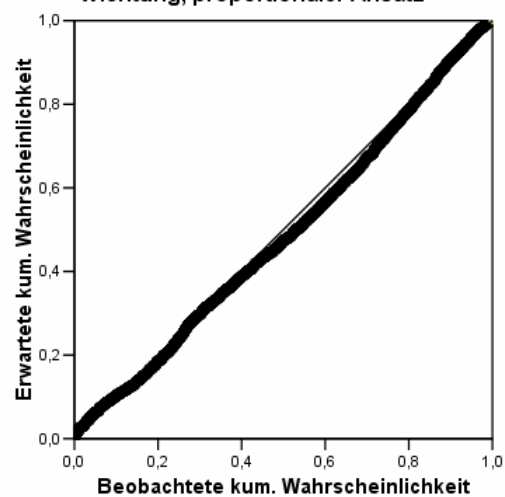


Häufigkeit der Residuen 100m-Vergleich SCRIM-GripTester, mit
Wichtung, proportionaler Ansatz

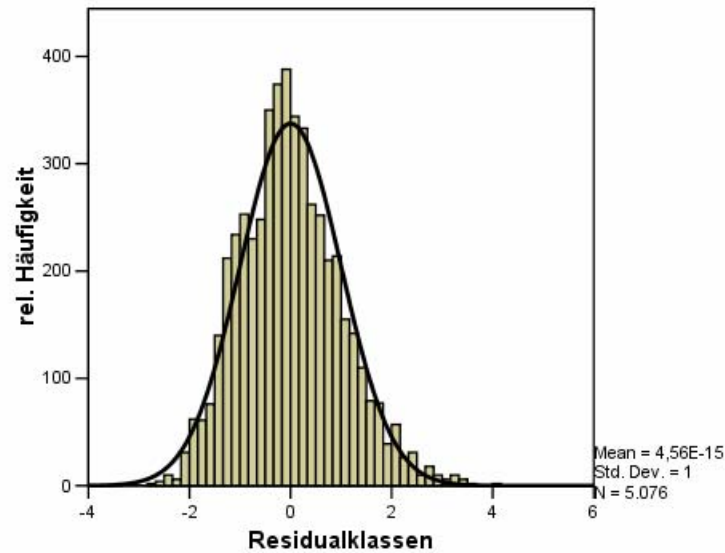


Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual

Häufigkeit der Residuen 100m-Vergleich SCRIM-GripTester, mit
Wichtung, proportionaler Ansatz

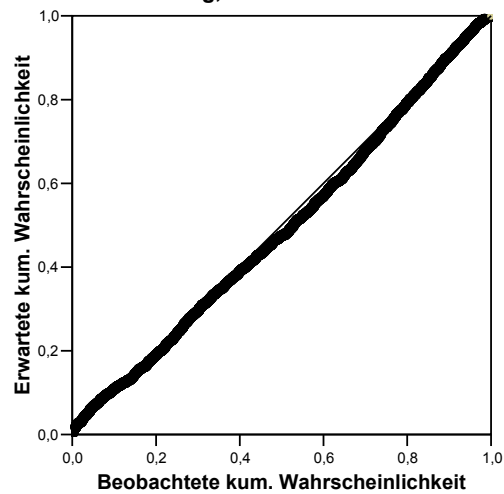


Häufigkeit der Residuen 100m-Vergleich SCRIM-GripTester, mit Wichtung, linearer Ansatz



Normal P-P Plot of Regression Standardized Residual

Häufigkeit der Residuen 100m-Vergleich SCRIM-GripTester, mit Wichtung, linearer Ansatz

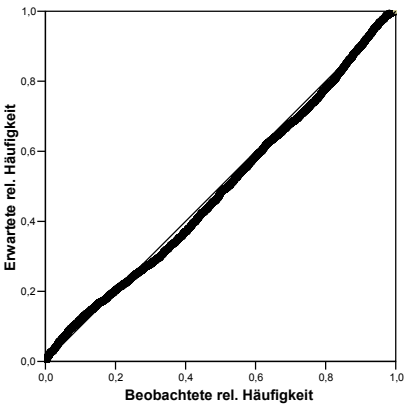


One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

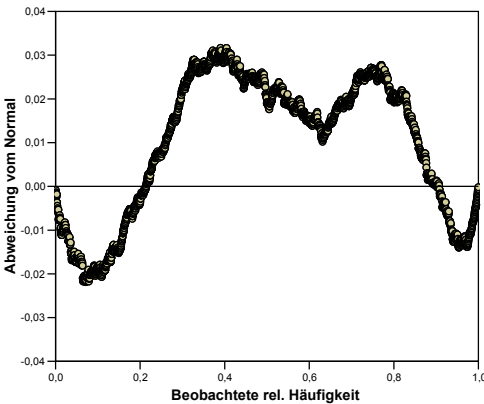
		diff. zu kalib
N		5076
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	-,00001
	Std. Deviation	,103230
Most Extreme Differences	Absolute	,032
	Positive	,032
	Negative	-,022
Kolmogorov-Smirnov Z		2,270
Asymp. Sig. (2-tailed)		,000

- a. Test distribution is Normal.
b. Calculated from data.

Normal P-P Plot der Standardisierten Residualverteilung
Kalibrierlinie (linear)



Detrended Normal P-P der Standardisierten Residualverteilung
Kalibrierlinie (linear)



Test auf Normalverteilung der Residuen zur Kalibrierlinie (linear)

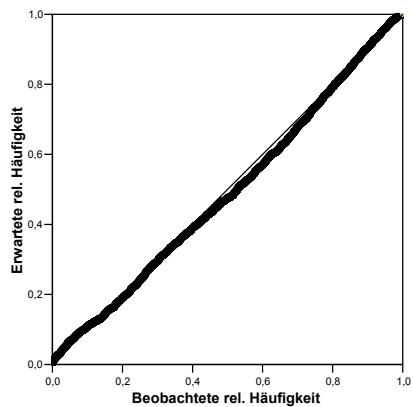
One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		diff. zu regre
N		5076
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	,00046
	Std. Deviation	,094797
Most Extreme Differences	Absolute	,033
	Positive	,033
	Negative	-,018
Kolmogorov-Smirnov Z		2,373
Asymp. Sig. (2-tailed)		,000

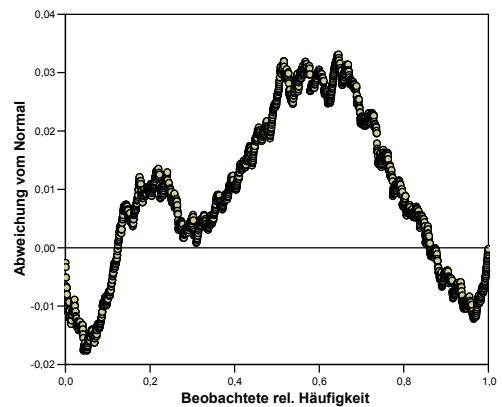
a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

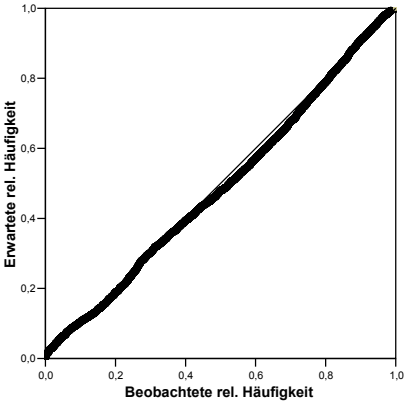
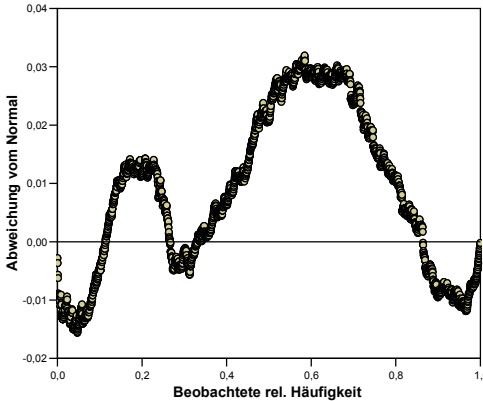
Normal P-P Plot der Standardisierten Residualverteilung
Regressionslinie (linear)



Detrended Normal P-P der Standardisierten
Residualverteilung Regressionslinie (linear)



Test auf Normalverteilung der Residuen zur Regressionslinie (linear)

One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test		
		diff_zu_kalib_prop
N		5076
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	-,00002
	Std. Deviation	,094954
Most Extreme Differences	Absolute	,032
	Positive	,032
	Negative	-,016
Kolmogorov-Smirnov Z		2,290
Asymp. Sig. (2-tailed)		,000
a. Test distribution is Normal.		
b. Calculated from data.		
<p>Normal P-P Plot der Standardisierten Residualverteilung Kalibrierlinie (proportional)</p> 		<p>Detrended Normal P-P Plot der Standardisierten Residualverteilung Kalibrierlinie (proportional)</p> 
Test auf Normalverteilung der Residuen zur Kalibrierlinie (proportional)		

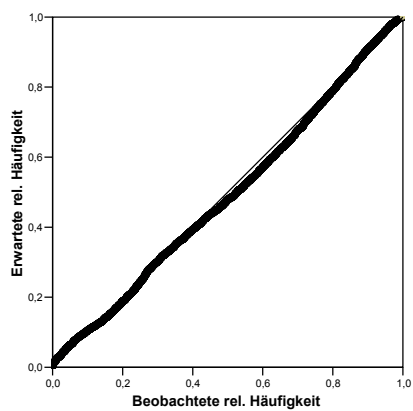
One-Sample Kolmogorov-Smirnov Test

		diff_zu_ regr_prop
N		5076
Normal Parameters ^{a,b}	Mean	-,00117
	Std. Deviation	,094940
Most Extreme Differences	Absolute	,031
	Positive	,031
	Negative	-,016
Kolmogorov-Smirnov Z		2,241
Asymp. Sig. (2-tailed)		,000

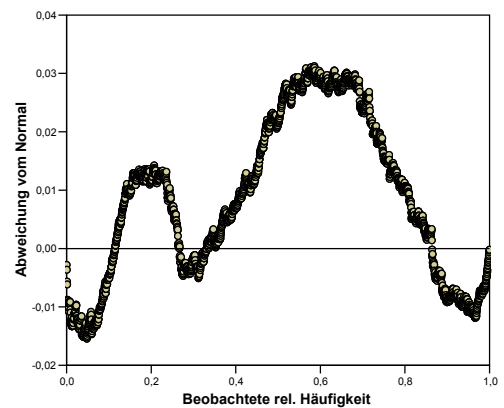
a. Test distribution is Normal.

b. Calculated from data.

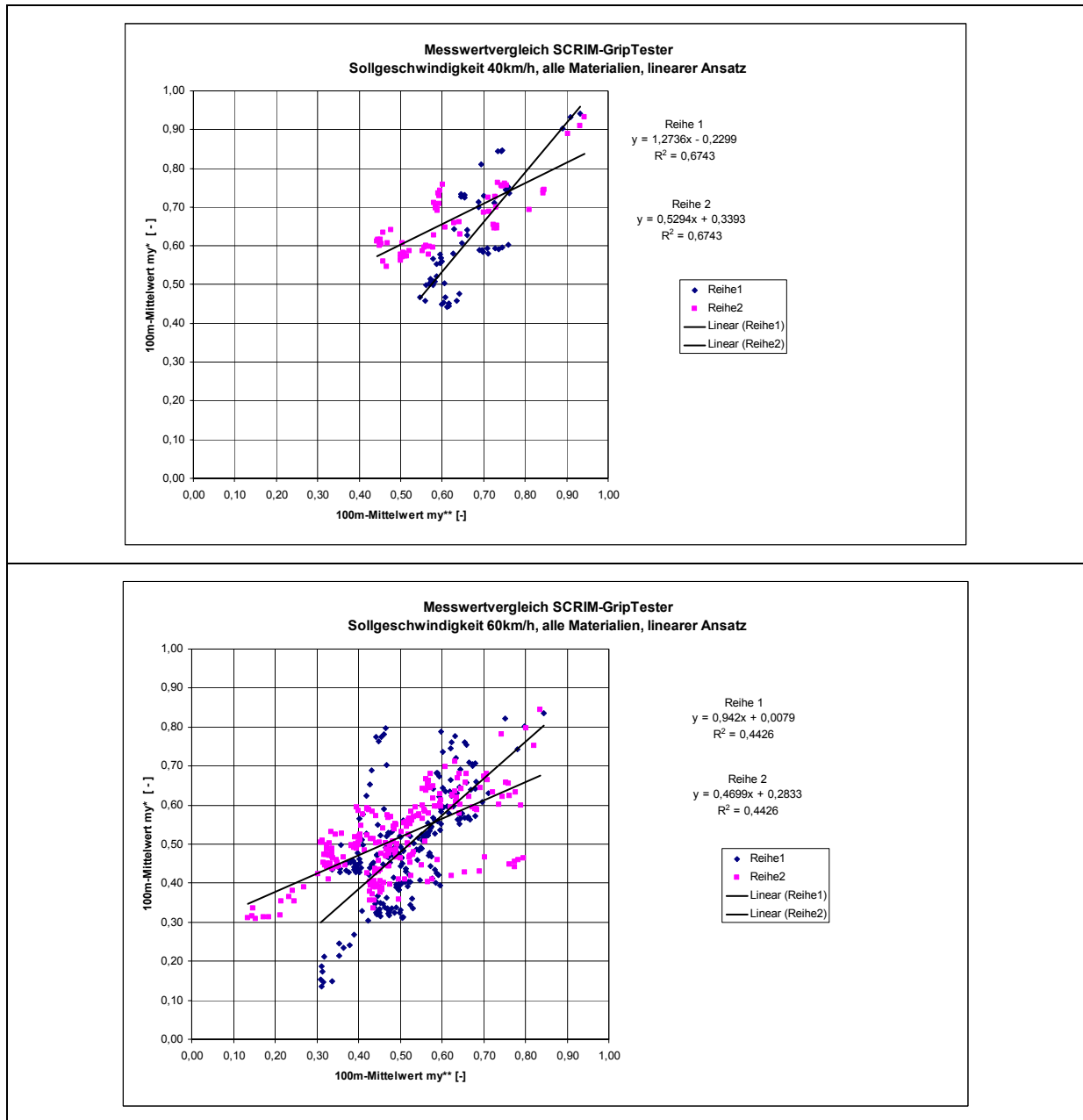
Normal P-P Plot der Standardisierten Residualverteilung
Regressionslinie (proportional)



Detrended Normal P-P Plot der Standardisierten
Residualverteilung Regressionslinie (proportional)

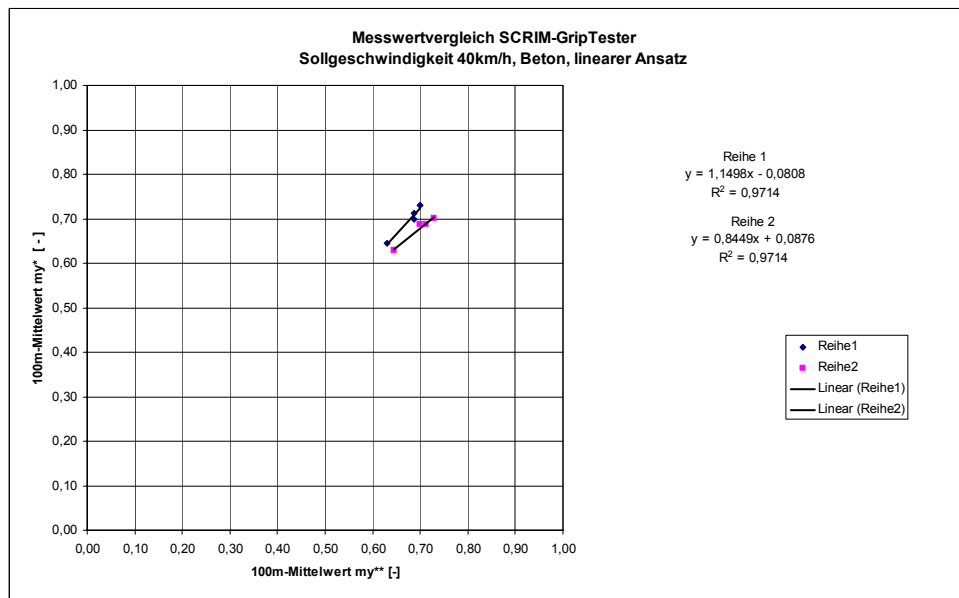
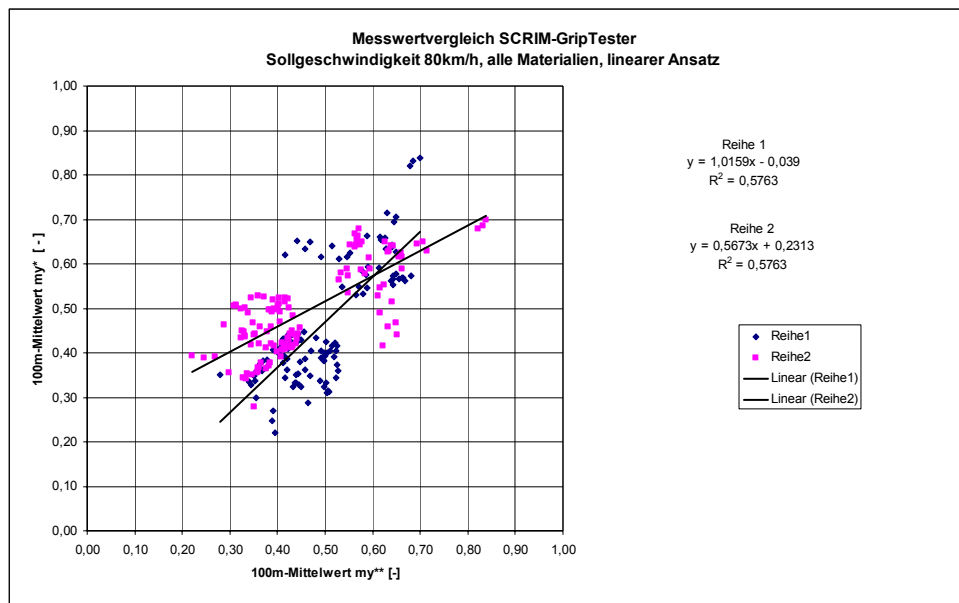


Test auf Normalverteilung der Residuen zur Regressionslinie (proportional)



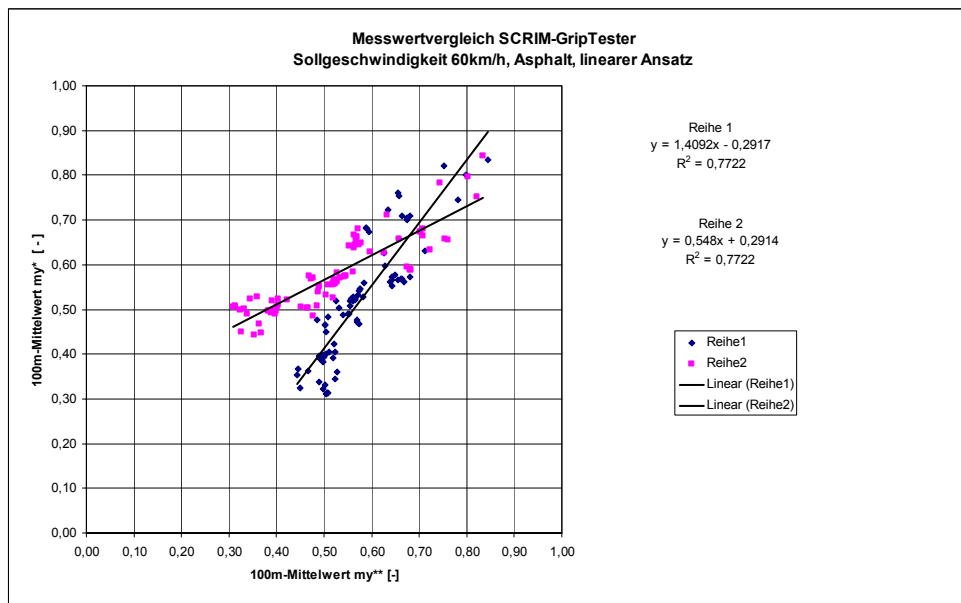
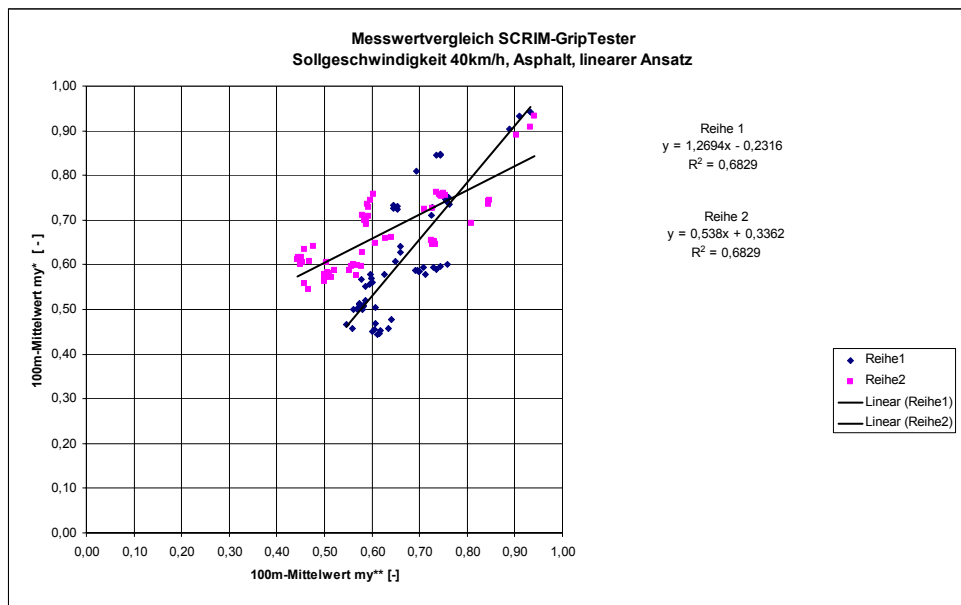
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



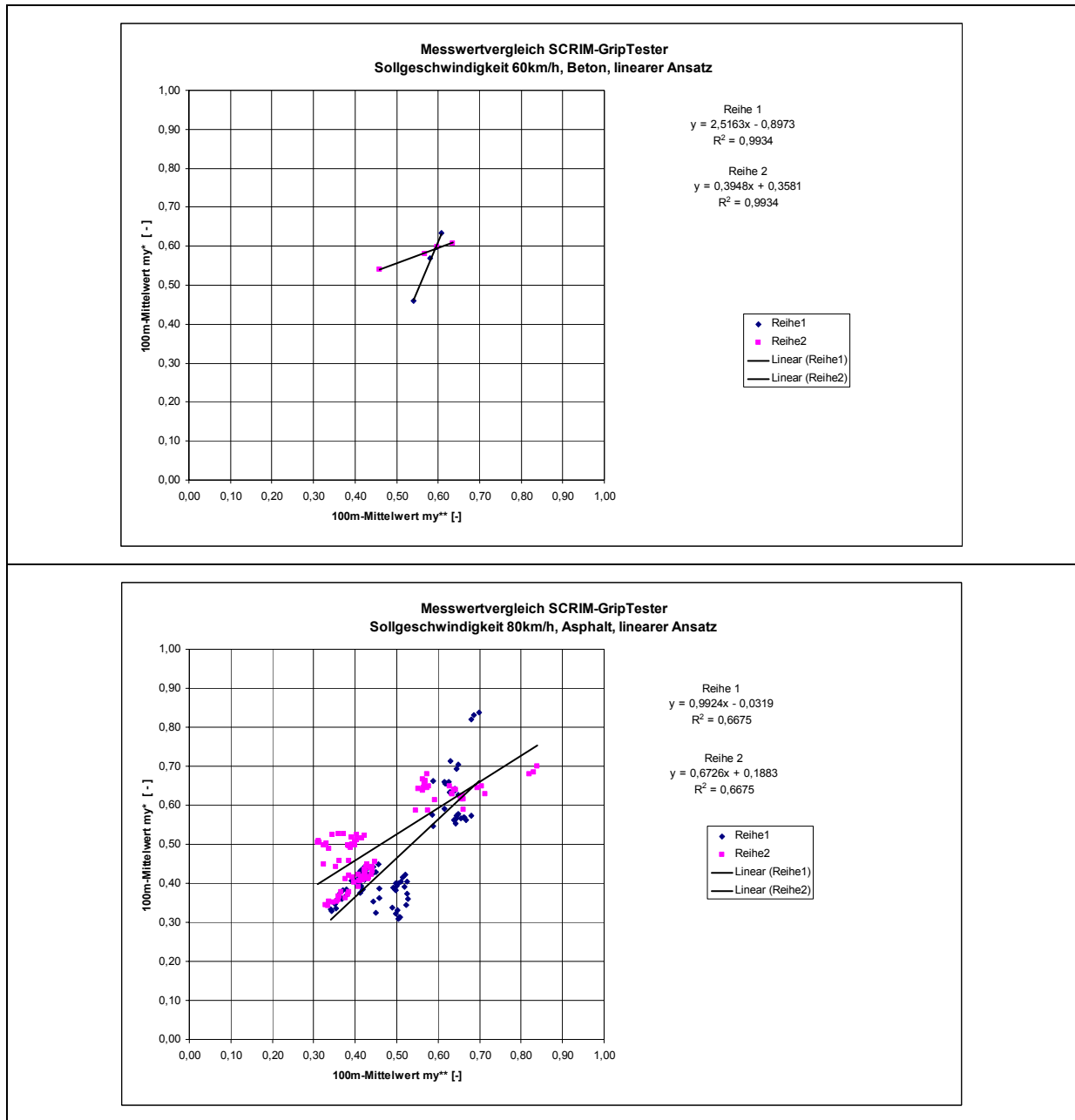
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



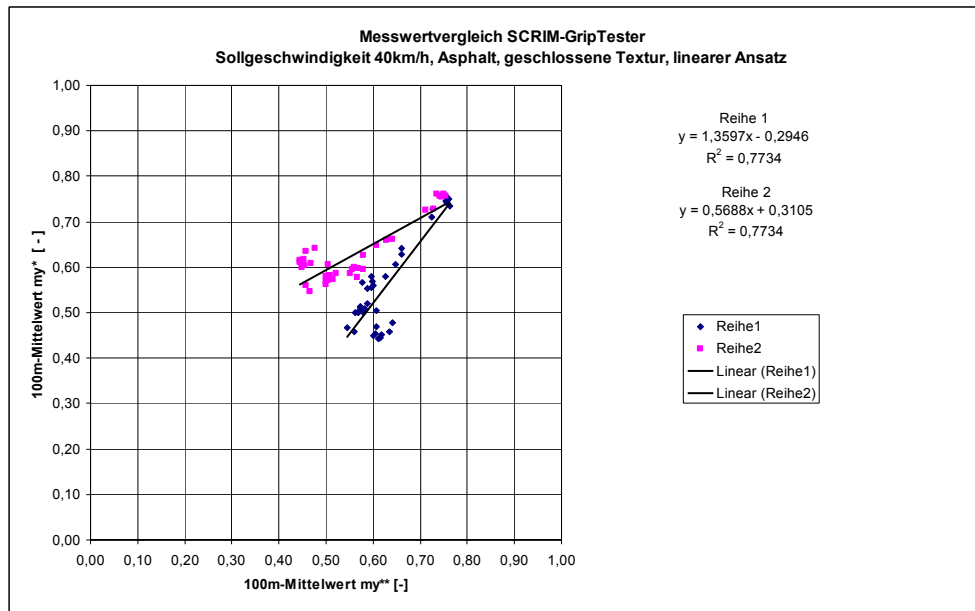
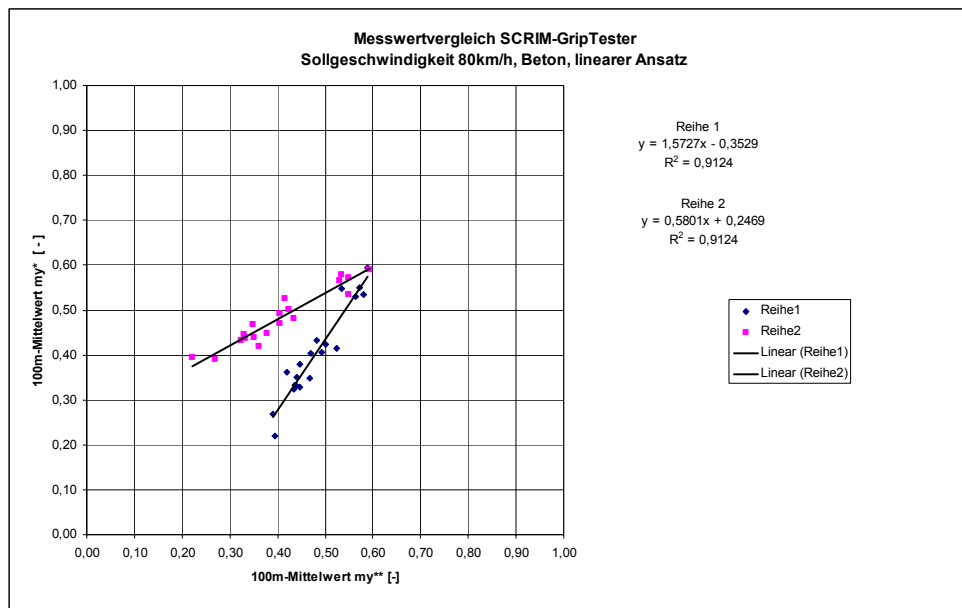
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



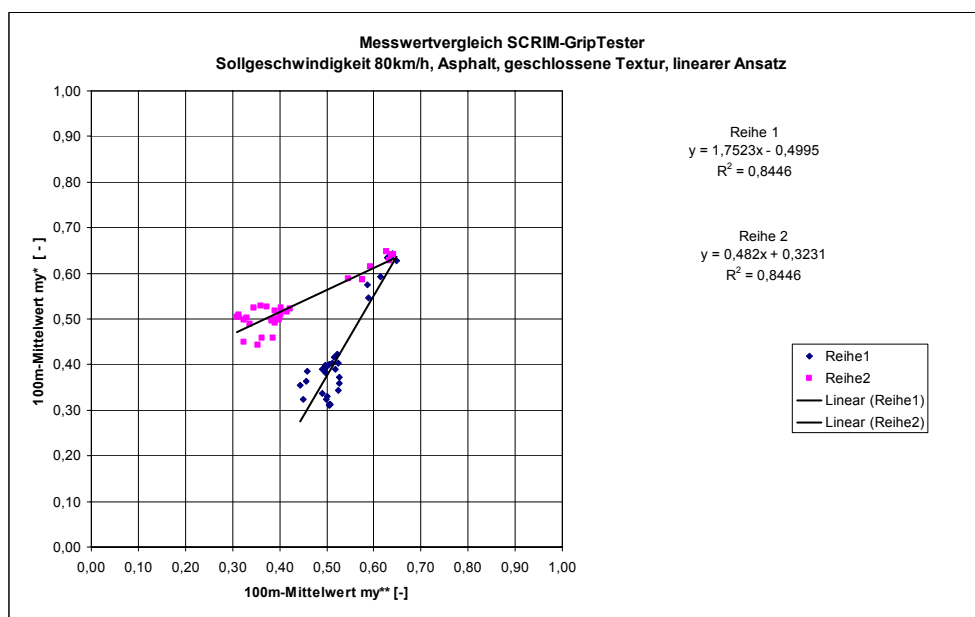
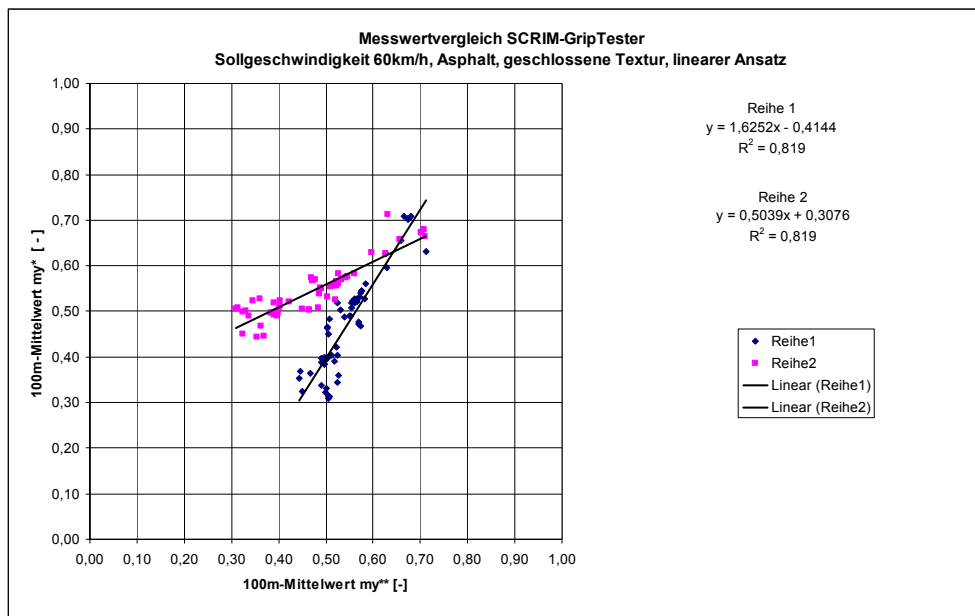
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}; \quad my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}; \quad my^{**} = \mu_{GT}$



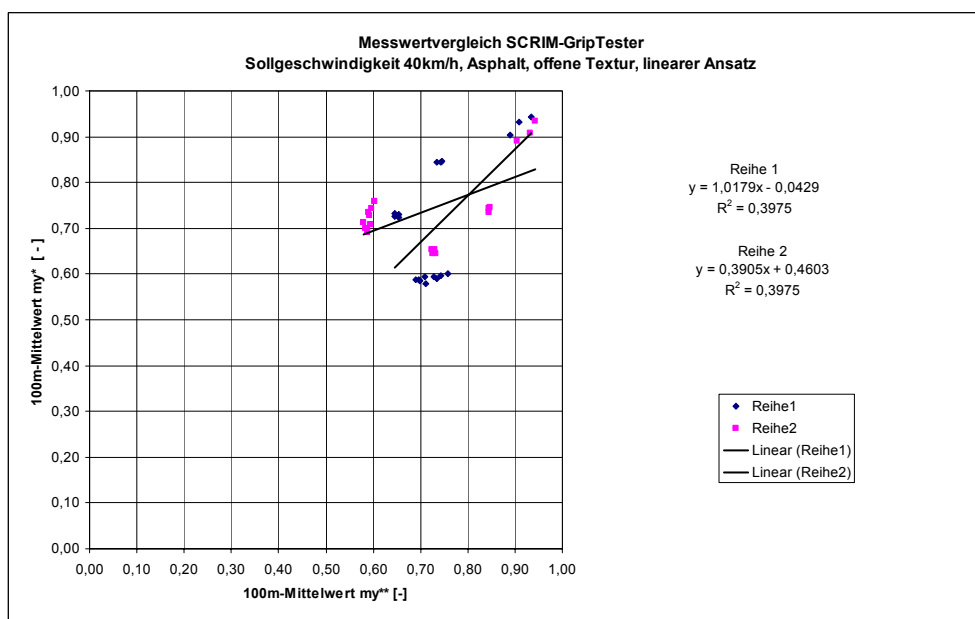
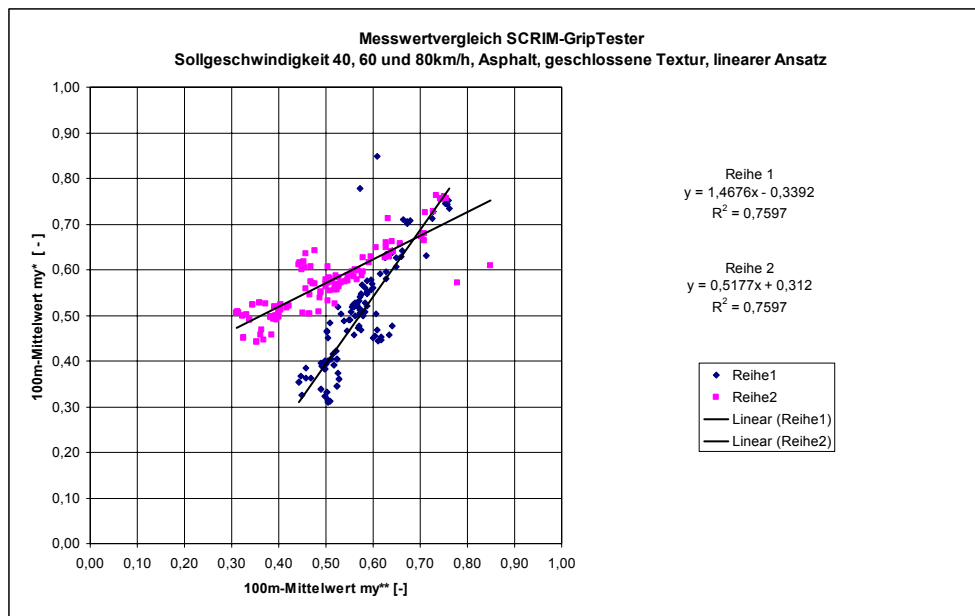
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



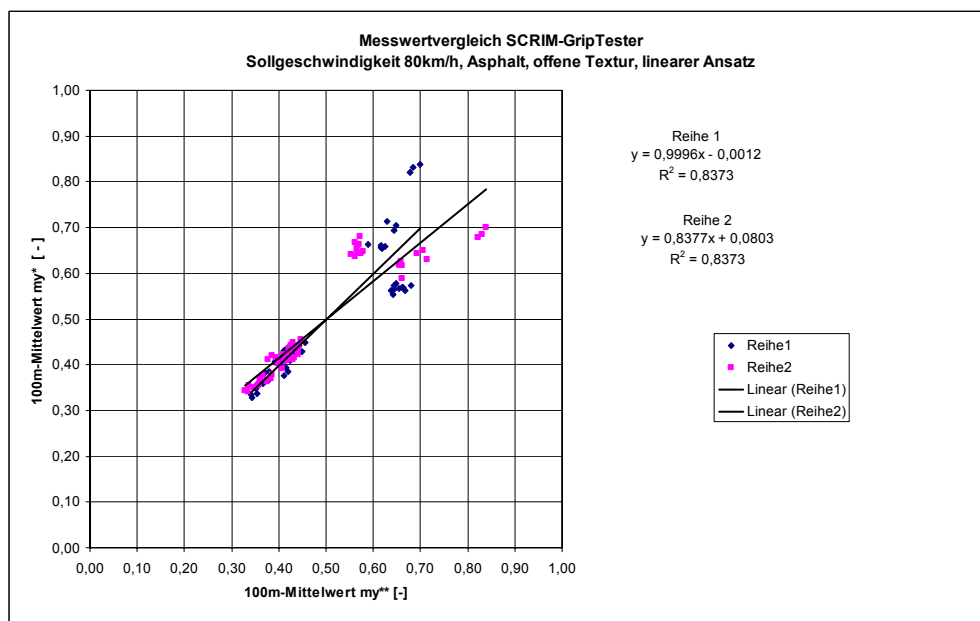
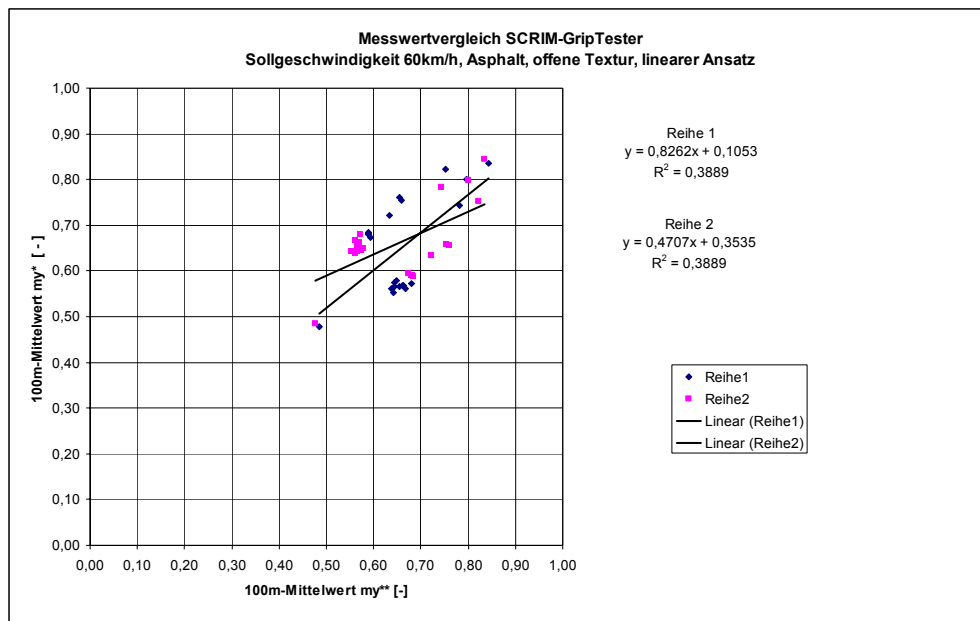
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



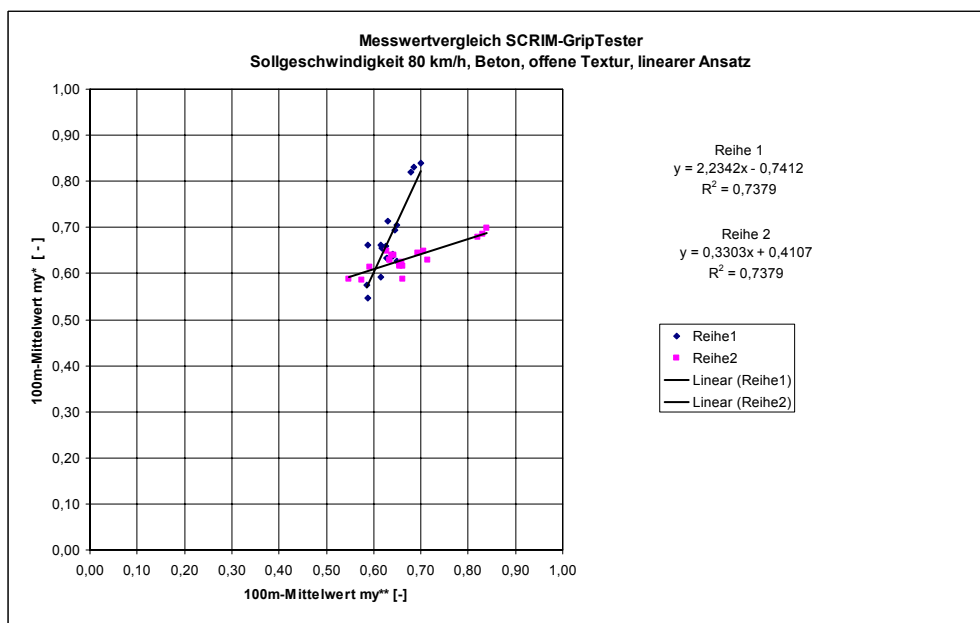
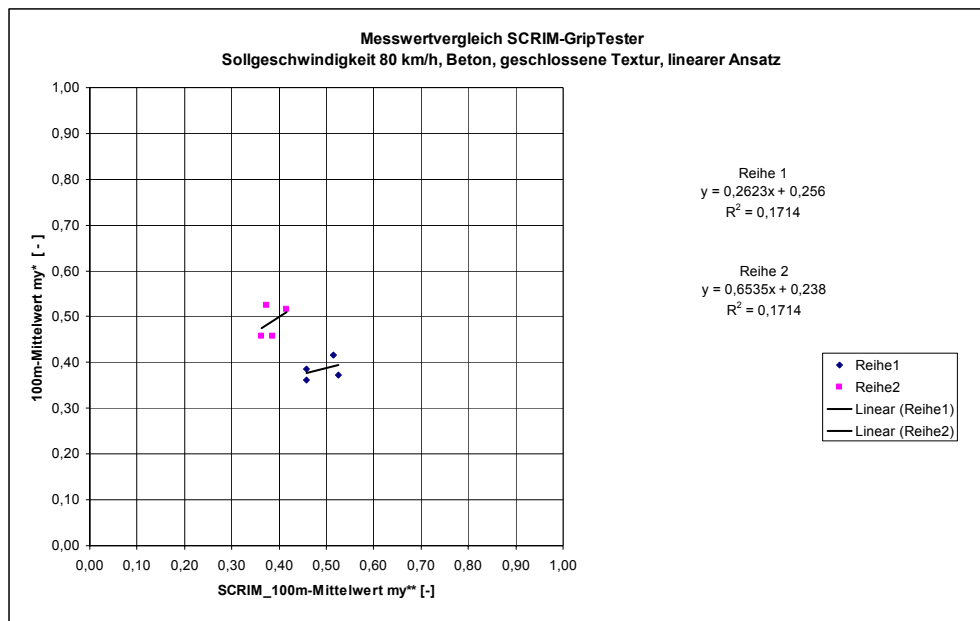
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



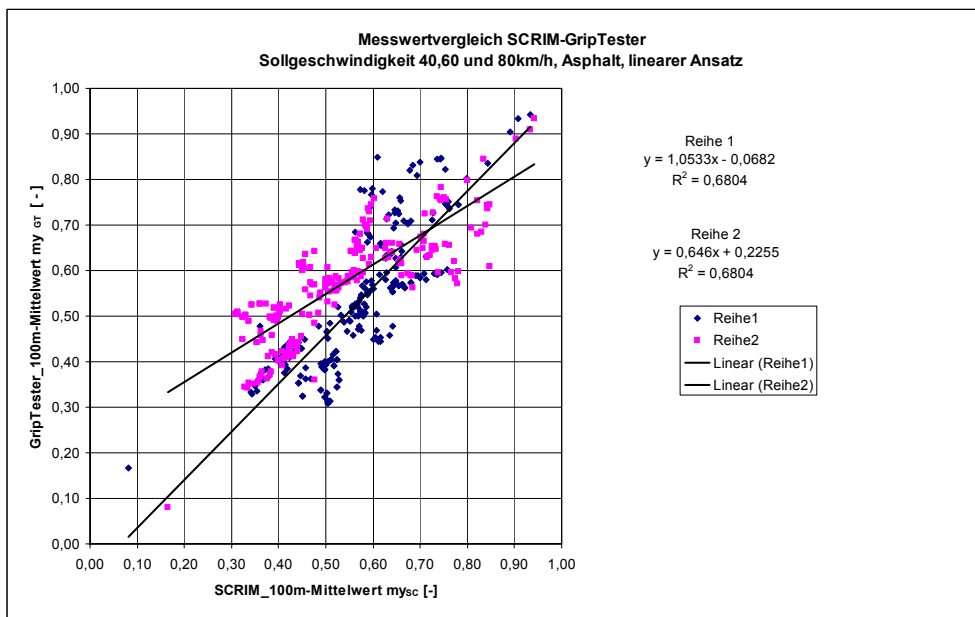
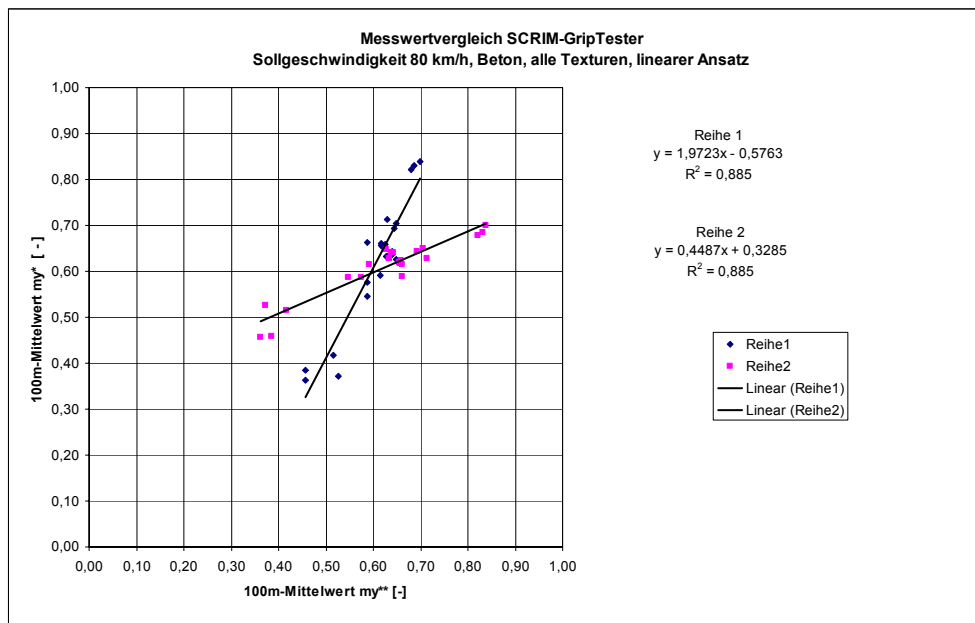
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



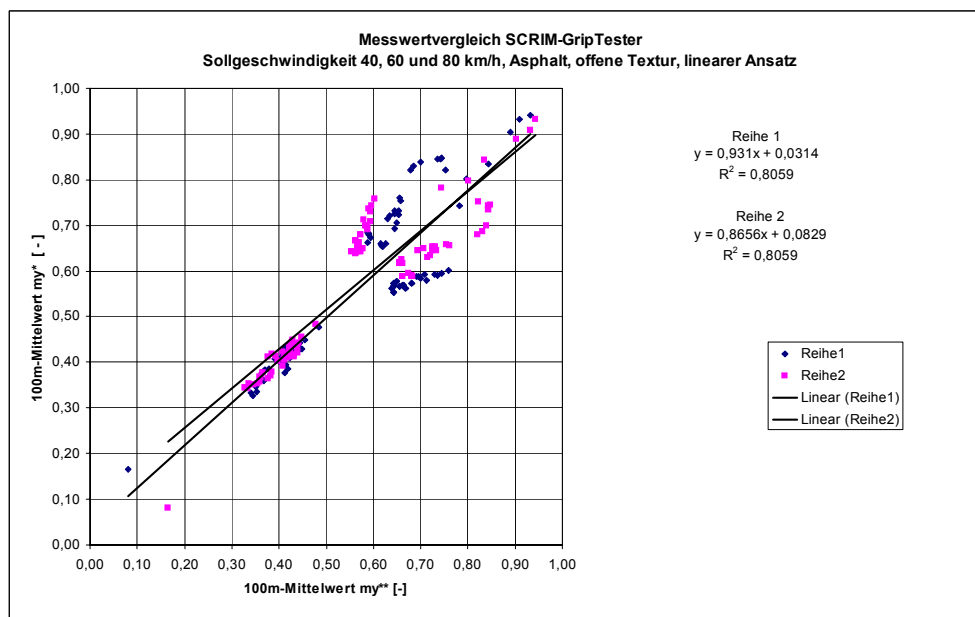
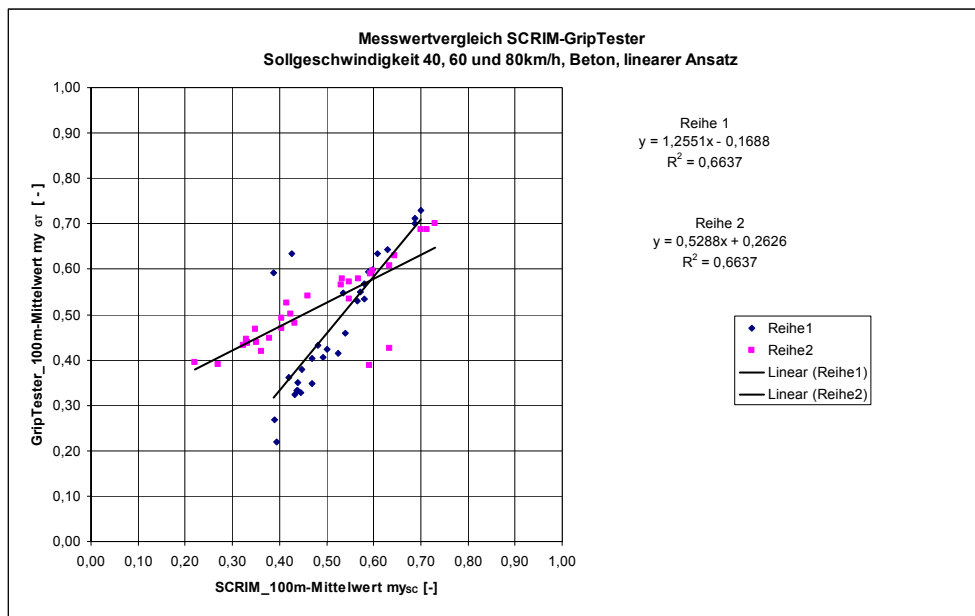
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}; \quad my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}; \quad my^{**} = \mu_{GT}$



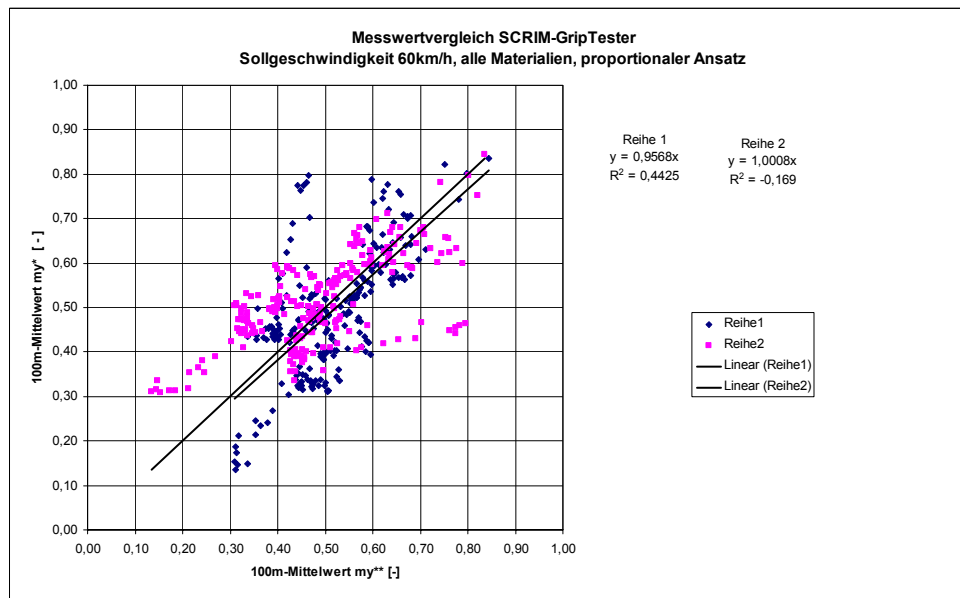
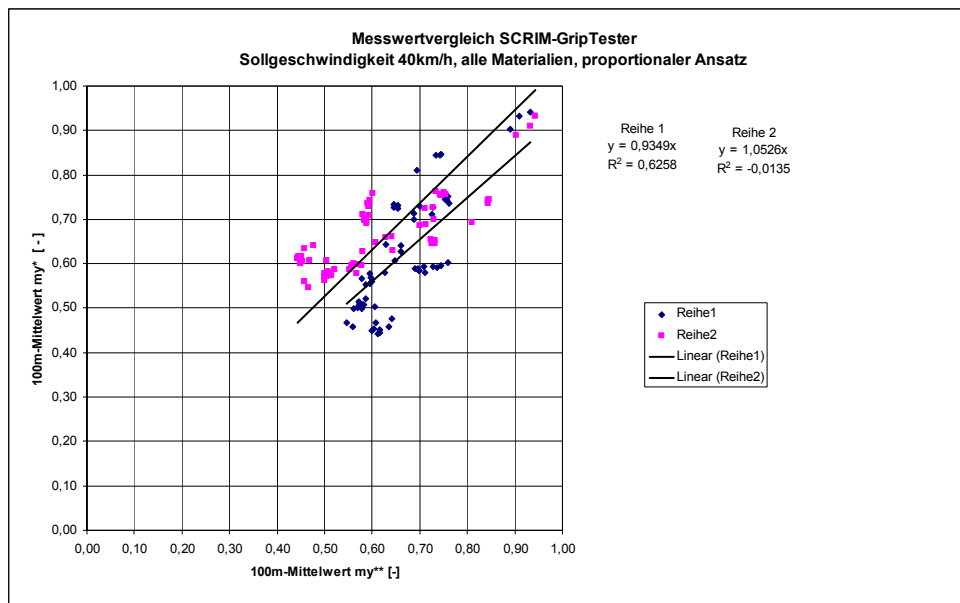
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



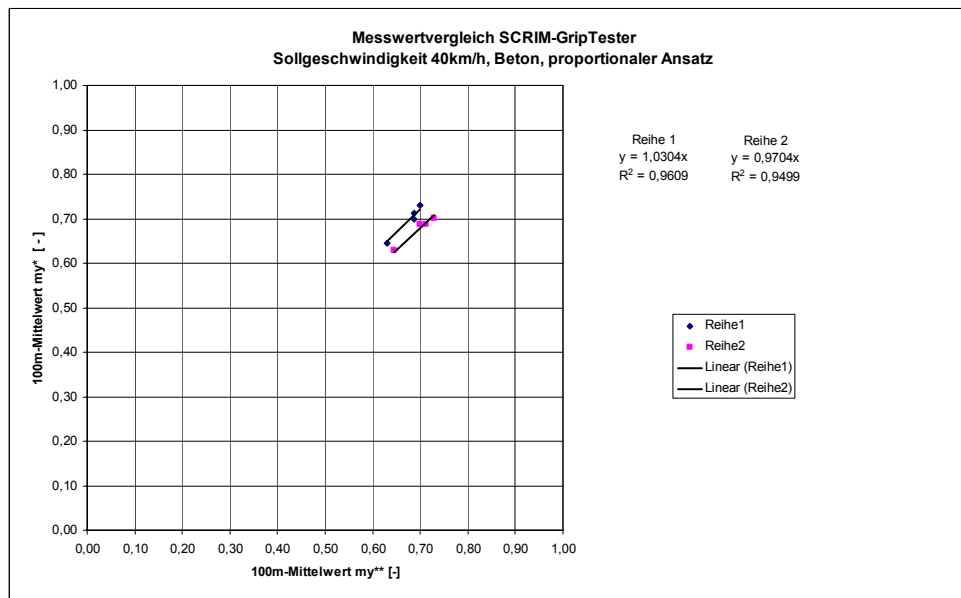
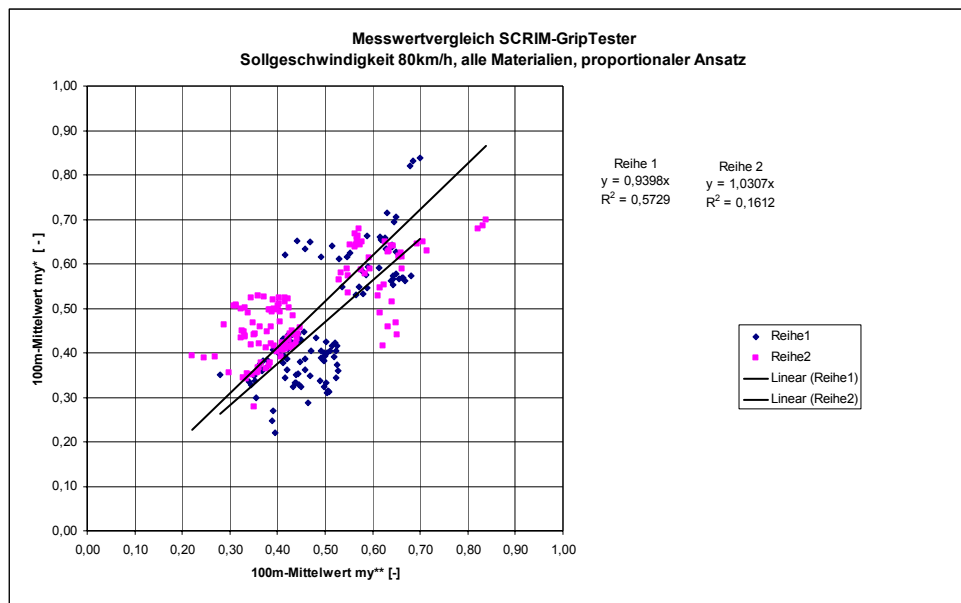
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



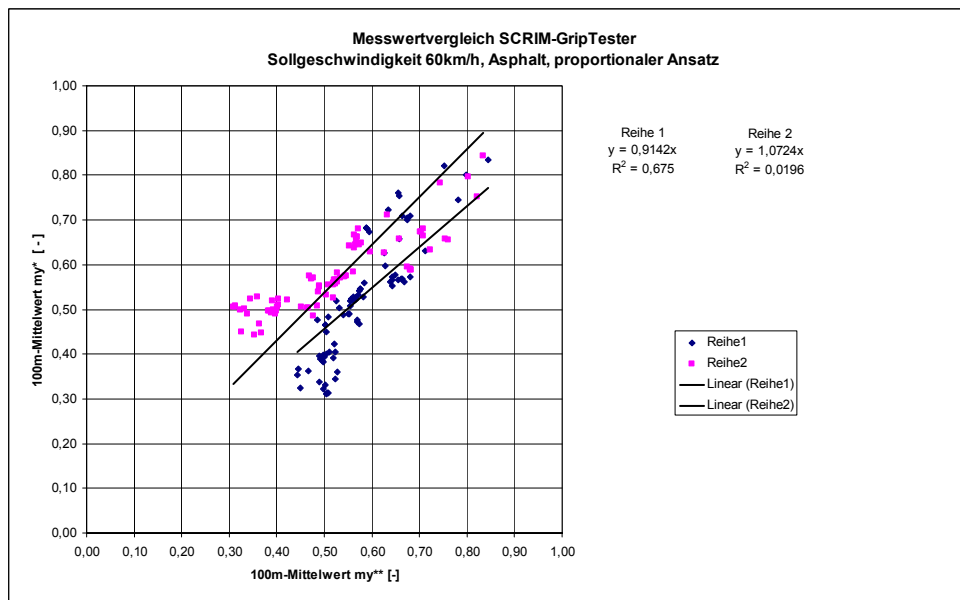
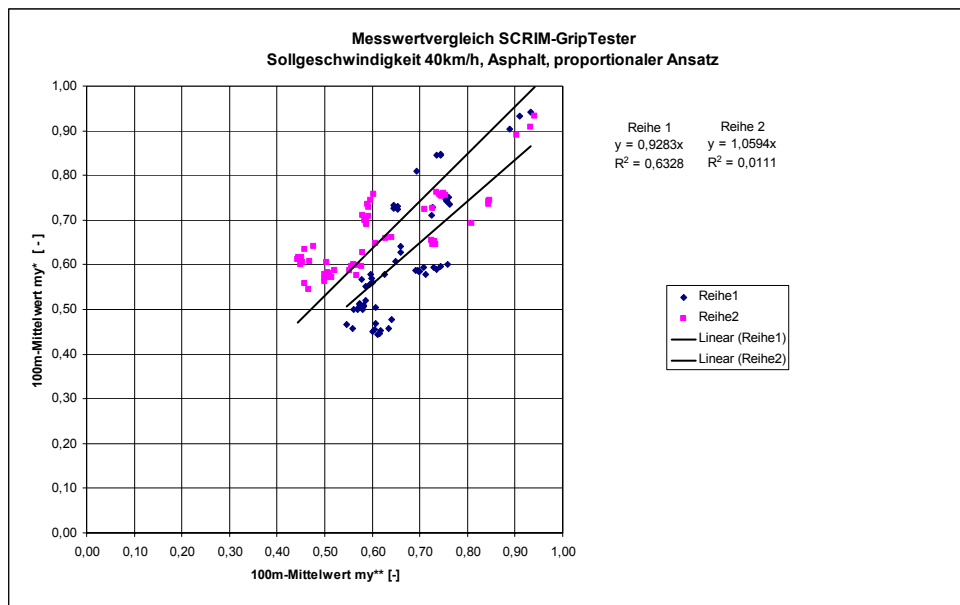
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



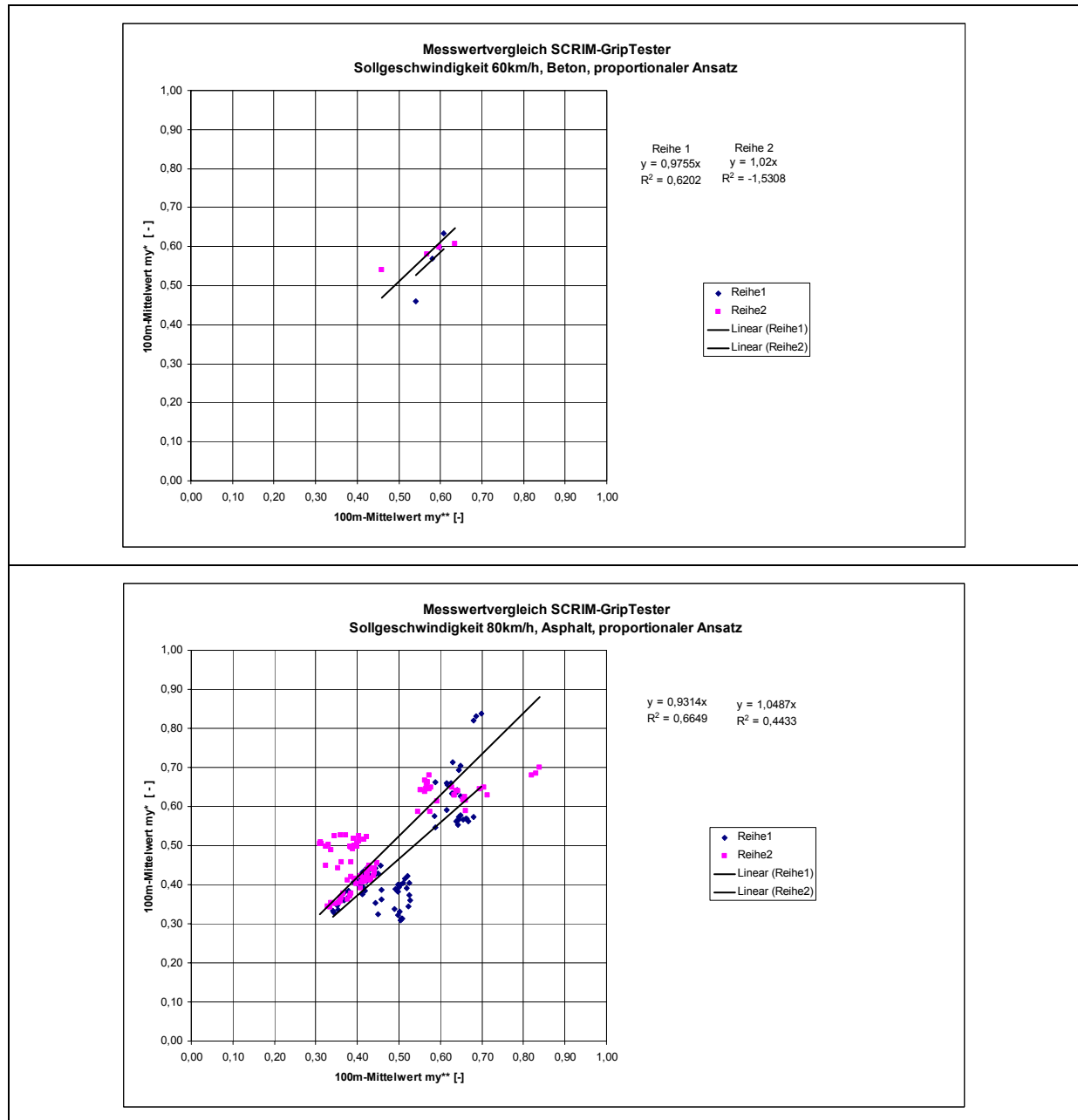
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



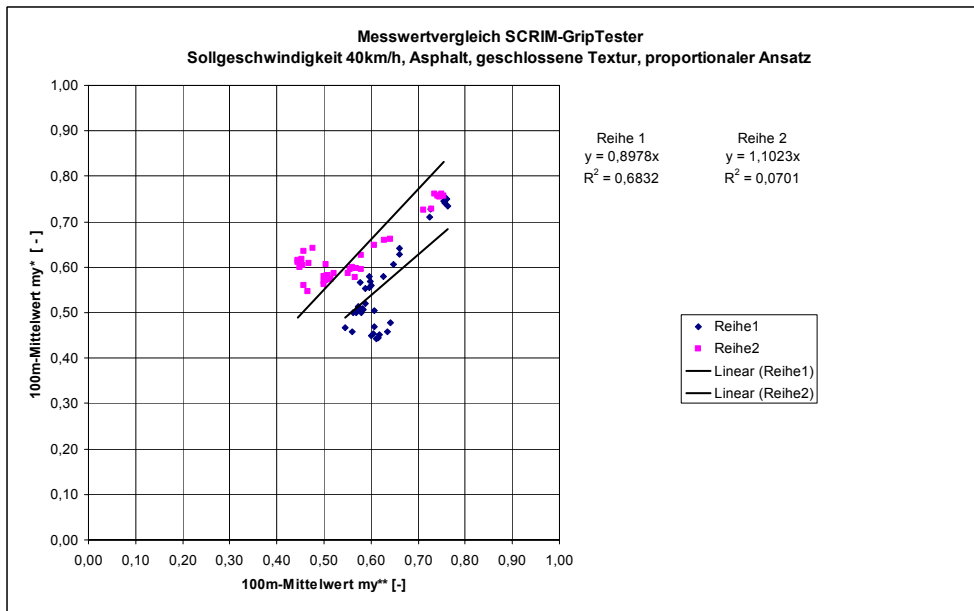
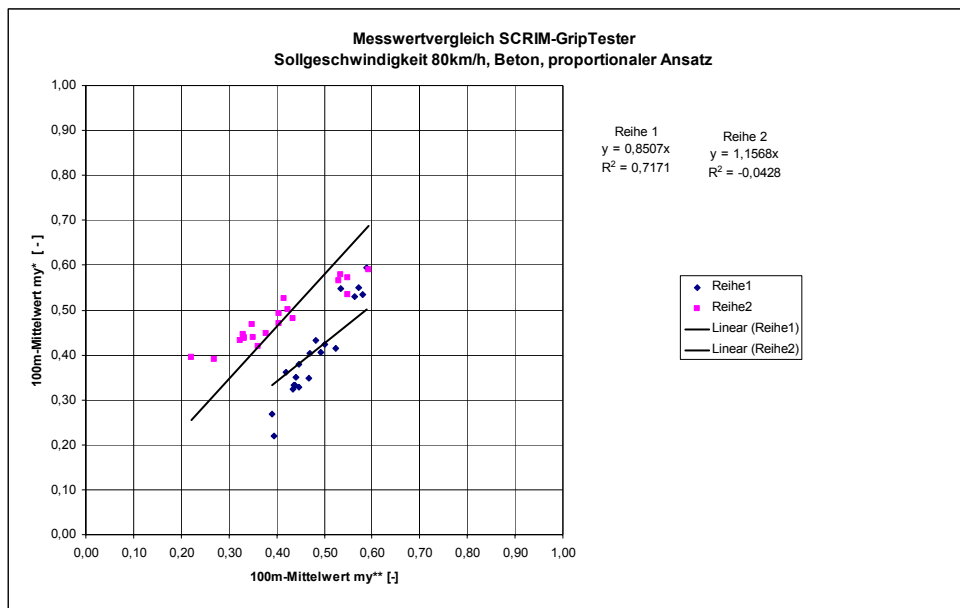
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}; \quad my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}; \quad my^{**} = \mu_{GT}$



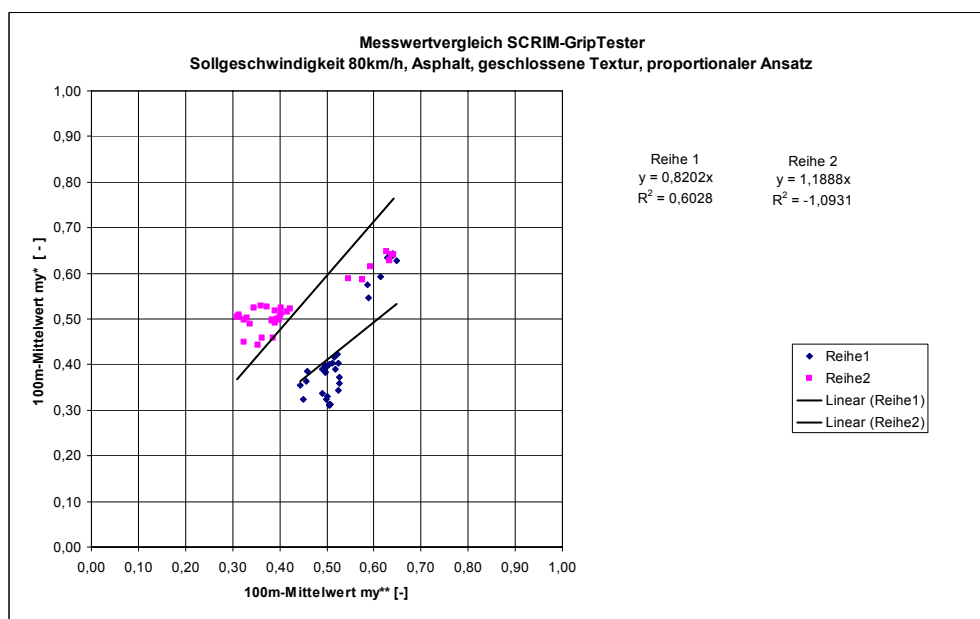
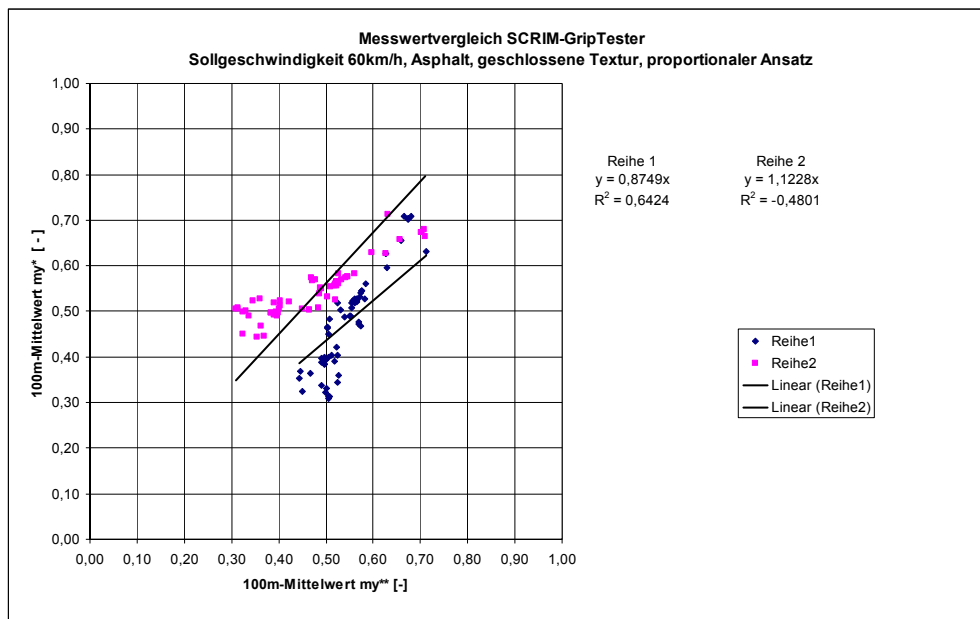
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



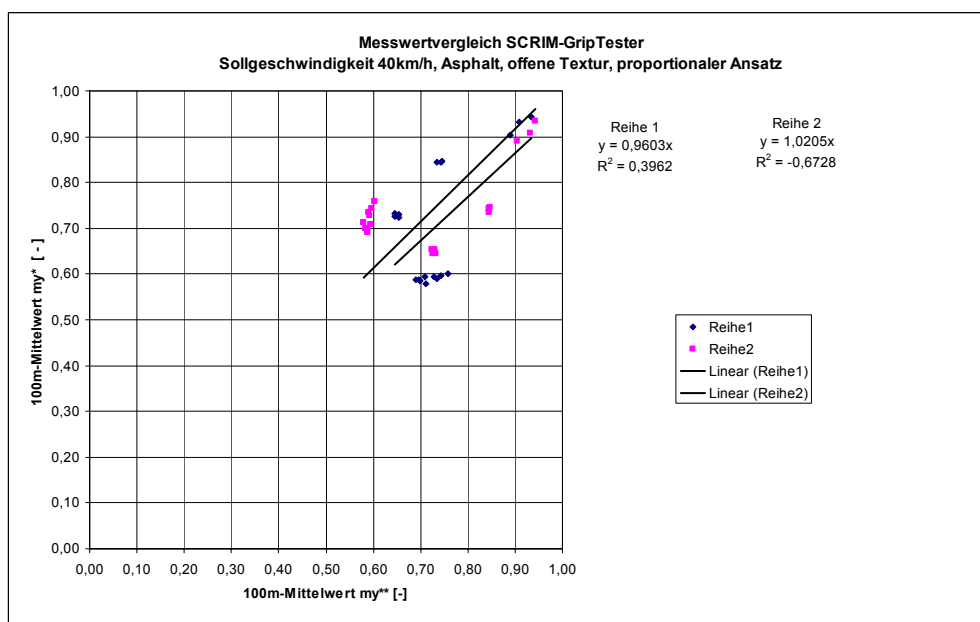
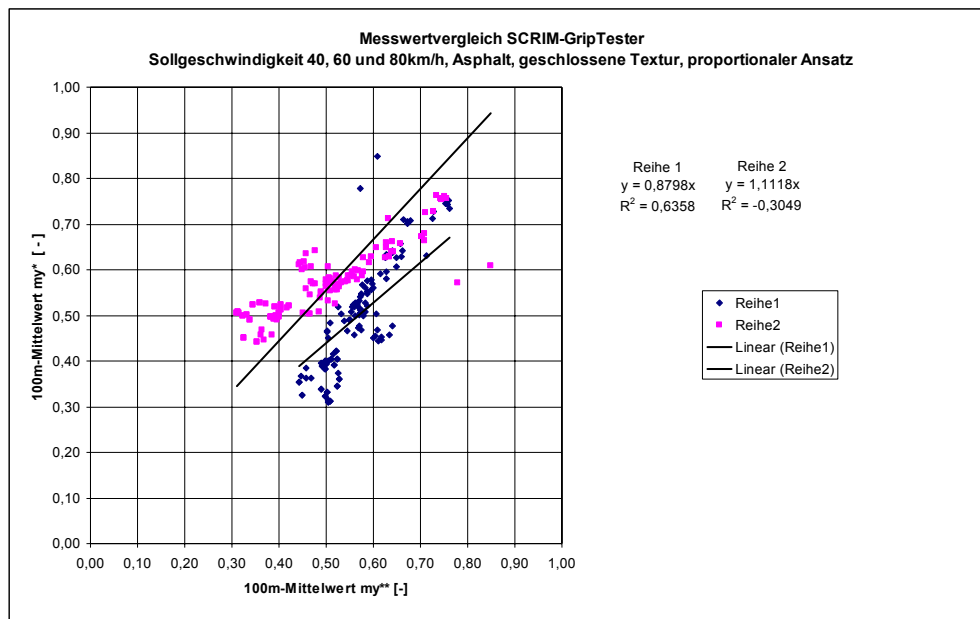
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



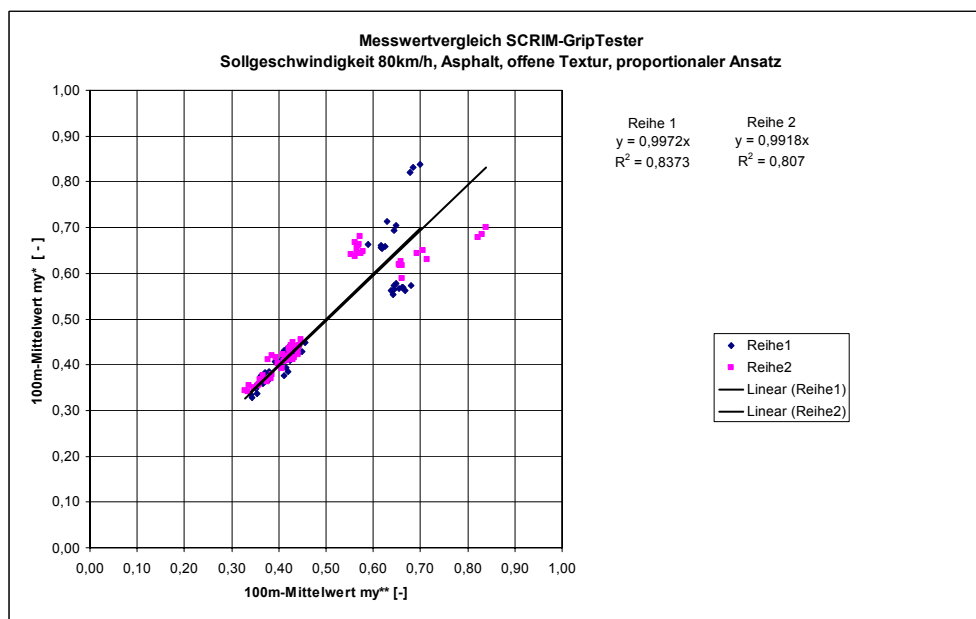
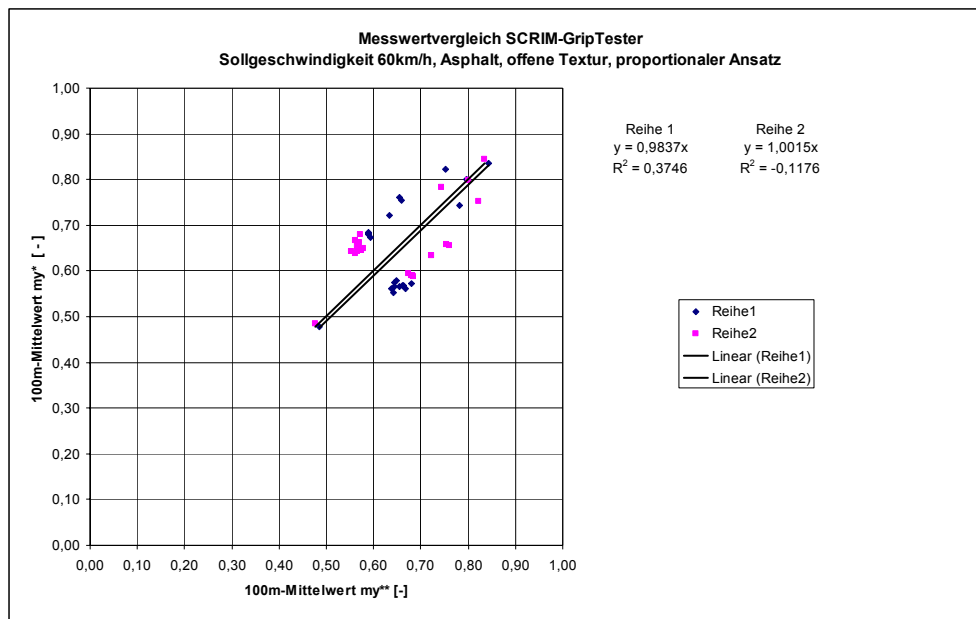
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



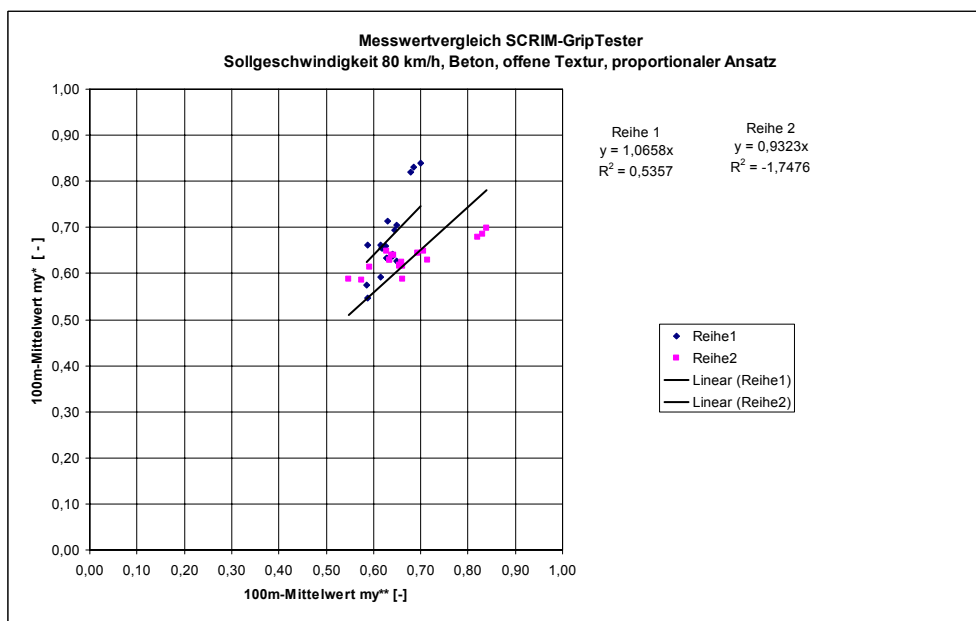
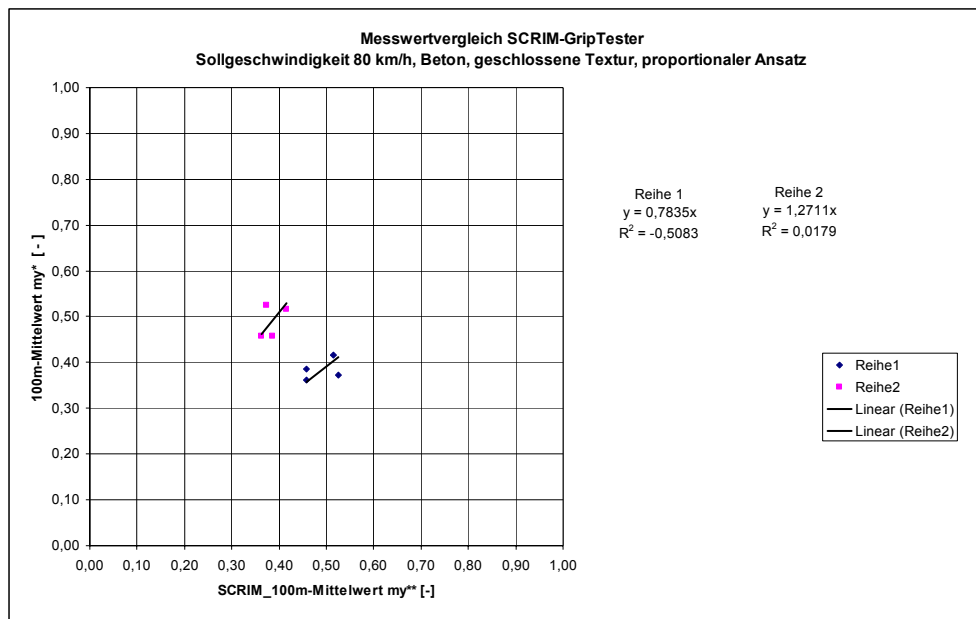
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



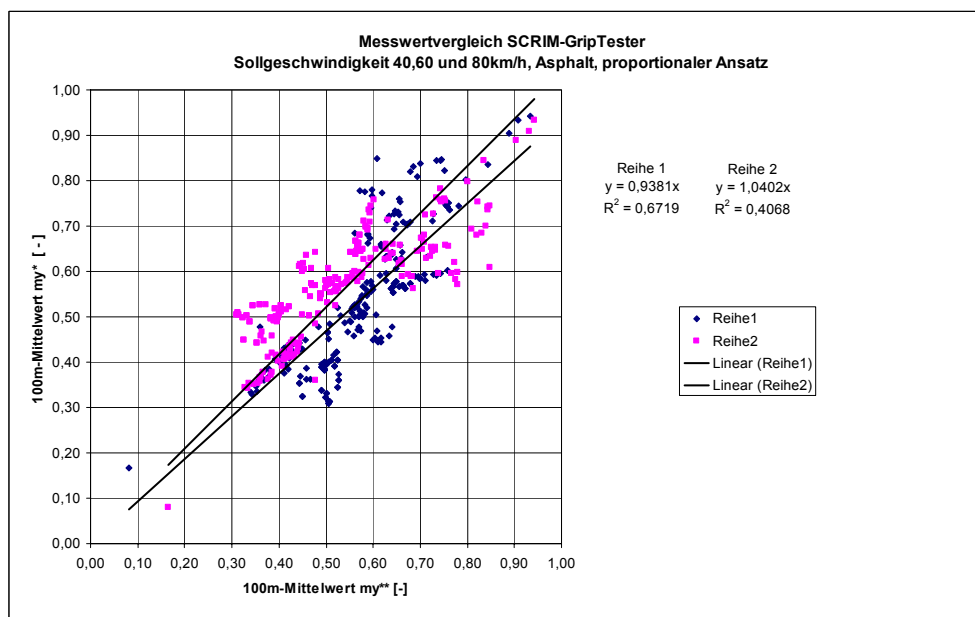
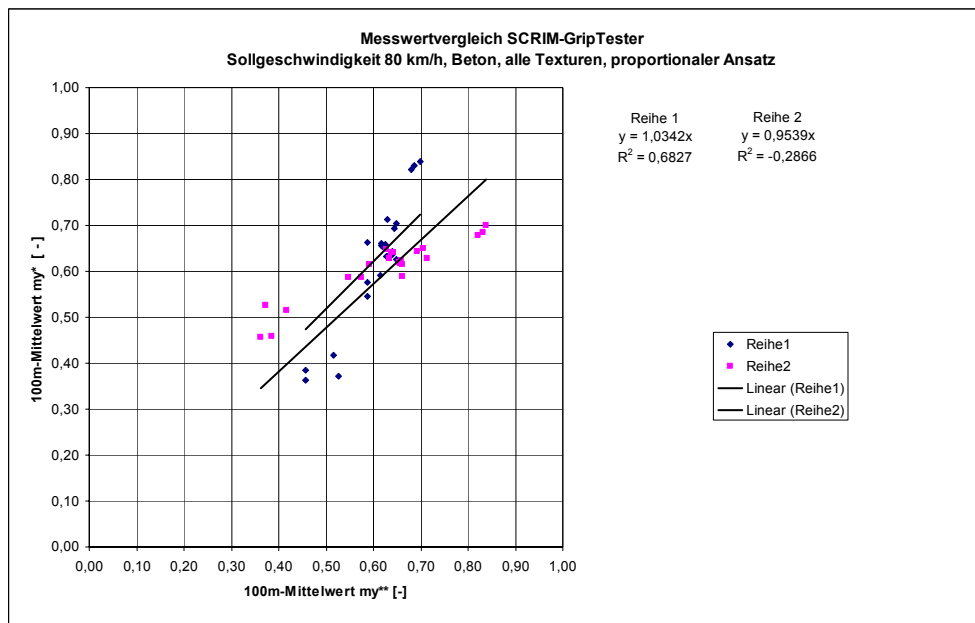
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



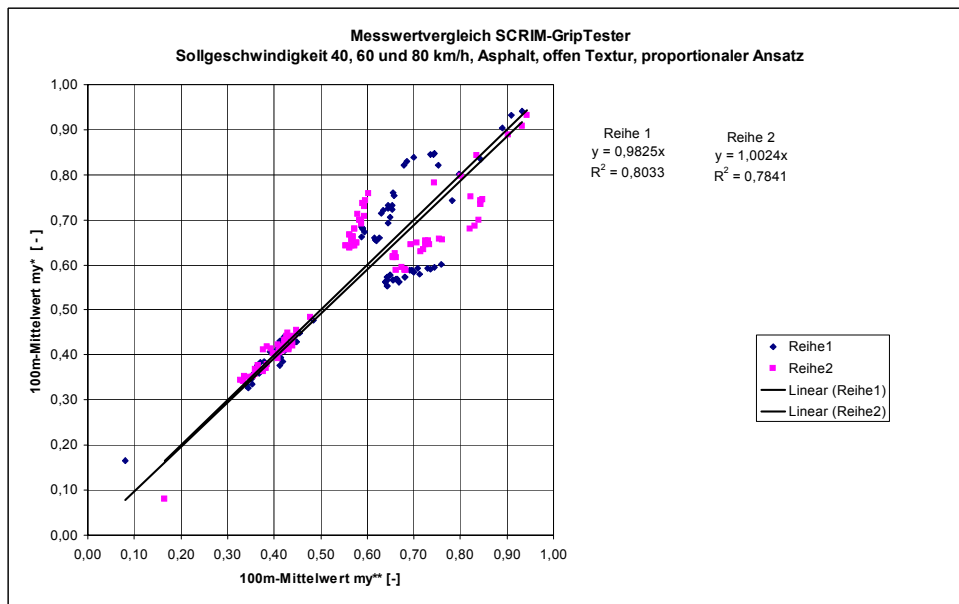
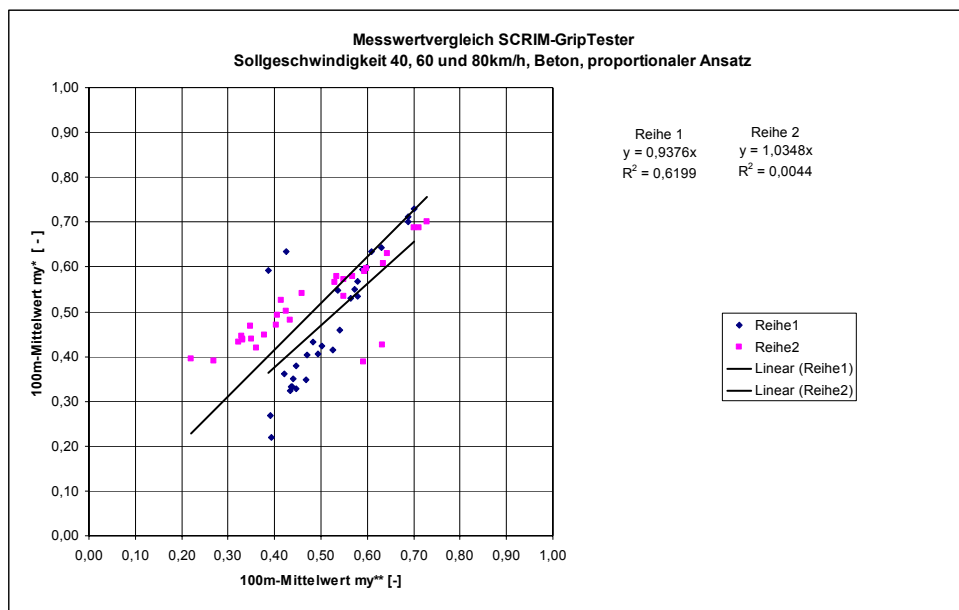
Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$



Reihe 1: $my^* = \mu_{GT}$; $my^{**} = \mu_{SC}$

Reihe 2: $my^* = \mu_{SC}$; $my^{**} = \mu_{GT}$

Untersuchungsziel	Klassen	Regressionsansatz	Klasse	Regressionsansatz
Einfluss des Deckschichtmaterials	Gruppe G2_A	$y = 0,9381 x$	Gruppe G2_B	$y = 0,9376 x$
		$x = 1,0402 y$		$x = 1,0348 y$
Einfluss der Geschwindigkeit auf Asphaltoberflächen	Gruppe G1-1_40	$y = 0,9283 x$	Gruppe G1-1_60	$y = 0,9142 x$
		$x = 1,0594 y$		$x = 1,0724 y$
	Gruppe G1-1_60	$Y = 0,9142 x$	Gruppe G1-1_80	$y = 0,9314 x$
		$x = 1,0724 y$		$x = 1,0487 y$
	Gruppe G1-1_40	$y = 0,9283 x$	Gruppe G1-1_80	$y = 0,9314 x$
		$x = 1,0594 y$		$x = 1,0487 y$
Einfluss der Geschwindigkeit auf Betonoberflächen	Gruppe G1-2_40	$y = 1,0304 x$	Gruppe G1-2_60	$y = 0,9755 x$
		$x = 0,9704 y$		$x = 1,02 y$
	Gruppe G1-2_60	$y = 0,9755 x$	Gruppe G1-2_80	$y = 0,8507 x$
		$x = 1,02 y$		$x = 1,1568 y$
	Gruppe G1-2_40	$y = 1,0304 x$	Gruppe G1-2_80	$y = 0,8507 x$
		$x = 0,9704 y$		$x = 1,1568 y$
Einfluss der Sollmessgeschwindigkeit	Gruppe G1_40	$y = 0,9349 x$	Gruppe G1_60	$y = 0,9568 x$
		$x = 1,0526 y$		$x = 1,0008 y$
	Gruppe G1_60	$y = 0,9568 x$	Gruppe G1_80	$y = 0,9398 x$
		$x = 1,0008 y$		$x = 1,0307 y$
	Gruppe G1_40	$y = 0,9349 x$	Gruppe G1_80	$y = 0,9398 x$
		$x = 1,0526 y$		$x = 1,0307 y$

	Gruppe G3_alle_o	$y = 0,9825 x$	Gruppe G3_alle_g	$y = 0,8798 x$
		$x = 1,0024 y$		$x = 1,1118 y$
Einfluss der Geschwindigkeit und der Textur auf Asphaltoberflächen	Gruppe G3_40_o	$y = 0,9603 x$	Gruppe G3_40_g	$y = 0,8978 x$
		$x = 1,0205 y$		$x = 1,1023 y$
	Gruppe G3_60_o	$y = 0,9837 x$	Gruppe G3_60_g	$y = 0,8749 x$
		$x = 1,0015 y$		$x = 1,1228 y$
	Gruppe G3_80_o	$y = 0,9972 x$	Gruppe G3_80_g	$y = 0,8202 x$
		$x = 0,9918 y$		$x = 1,1888 y$
Einfluss der Geschwindigkeit und der Textur auf Betonoberfläche	Gruppe G4_80_o	$y = 0,9323 x$	Gruppe G4_80_m	$y = 0,7835 x$
		$x = 1,0658 y$		$x = 1,2711 y$

Funktionswerte und Parameter siehe Anlage A8

Anlage A10.1	Zusammenstellung für Test auf signifikante Abweichung der Zusammenhangsfunktion (proportional)	Blatt 66
---------------------	---	-----------------

Untersuchungsziel	Klasse	Regressionsansatz	Klasse	Regressionsansatz
Einfluss des Deckschicht-materials	Gruppe G2_A	$y = 1,0533 x - 0,0682$	Gruppe G2_B	$y = 1,2551 x - 0,1688$
		$x = 0,646 y + 0,2255$		$x = 0,5288 y + 0,2626$
Einfluss der Geschwindigkeit auf Asphalt-oberflächen	Gruppe G1-1_40	$y = 1,2694 x - 0,2316$	Gruppe G1-1_60	$y = 1,4092 x - 0,2917$
		$x = 0,538 y + 0,3362$		$x = 0,548 y + 0,2914$
	Gruppe G1-1_60	$y = 1,4092 x - 0,2917$	Gruppe G1-1_80	$y = 0,9924 x - 0,0319$
		$x = 0,548 y + 0,2914$		$x = 0,6726 y + 0,1883$
	Gruppe G1-1_40	$y = 1,2694 x - 0,2316$	Gruppe G1-1_80	$y = 0,9924 x - 0,0319$
		$x = 0,538 y + 0,3362$		$x = 0,6726 y + 0,1883$
Einfluss der Geschwindigkeit auf Betonoberflächen	Gruppe G1-2_40	$y = 1,1498 x - 0,0808$	Gruppe G1-2_60	$y = 2,5163 x - 0,8973$
		$x = 0,8449 y + 0,0876$		$x = 0,3948 y + 0,3581$
	Gruppe G1-2_60	$y = 2,5163 x - 0,8973$	Gruppe G1-2_80	$y = 1,5727 x - 0,3529$
		$x = 0,3948 y + 0,3581$		$x = 0,5801 y + 0,2469$
	Gruppe G1-2_40	$y = 1,1498 x - 0,0808$	Gruppe G1-2_80	$y = 1,5727 x - 0,3529$
		$x = 0,8449 y + 0,0876$		$x = 0,5801 y + 0,2469$
Einfluss der Sollmess-geschwindigkeit	Gruppe G1_40	$y = 1,2736 x - 0,2299$	Gruppe G1_60	$y = 0,942 x + 0,0079$
		$x = 0,5294 y + 0,3393$		$x = 0,4699 y + 0,2833$
	Gruppe G1_60	$y = 0,942 x + 0,0079$	Gruppe G1_80	$y = 1,0159 x - 0,039$
		$x = 0,4699 y + 0,2833$		$x = 0,5673 y + 0,2313$
	Gruppe G1_40	$y = 1,2736 x - 0,2299$	Gruppe G1_80	$y = 1,0159 x - 0,039$
		$x = 0,5294 y + 0,3393$		$x = 0,5673 y + 0,2313$

Anlage A10.2	Zusammenstellung für Test auf signifikante Abweichung der Zusammenhangsfunktion (linear)	Blatt 67
--------------	---	-----------------

Einfluss der Textur auf Asphaltoberflächen	Gruppe G3_alle_o	$y = 0,931 x + 0,0314$	Gruppe G3_alle_g	$y = 1,4676 x - 0,3392$
		$x = 0,8656 y + 0,0829$		$x = 0,5177 y + 0,312$
Einfluss der Geschwindigkeit und der Textur auf Asphaltoberflächen	Gruppe G3_40_o	$y = 1,0179 x - 0,0429$	Gruppe G3_40_g	$y = 1,3597 x - 0,2946$
		$x = 0,3905 y + 0,4603$		$x = 0,5688 y + 0,3105$
	Gruppe G3_60_o	$y = 0,8262 x + 0,1053$	Gruppe G3_60_g	$y = 1,6252 x - 0,4144$
		$x = 0,4707 y + 0,3535$		$x = 0,5039 y + 0,3076$
	Gruppe G3_80_o	$y = 0,9996 x - 0,0012$	Gruppe G3_80_g	$y = 1,7523 x - 0,4995$
		$x = 0,8377 y + 0,0803$		$x = 0,482 y + 0,3231$
Einfluss der Geschwindigkeit und der Textur auf Betonoberfläche	Gruppe G4_80_o	$y = 2,2342 x - 0,7412$	Gruppe G4_80_m	$y = 0,2623 x + 0,256$
		$x = 0,3303 y + 0,4107$		$x = 0,6535 y + 0,238$

Funktionswerte und Parameter siehe Anlage A9

Anlage A10.2	Zusammenstellung für Test auf signifikante Abweichung der Zusammenhangsfunktion (linear)	Blatt 68
--------------	---	----------

Untersuchungsziel	Vergleich der Klassen	Richtg.	Prüf-wert	Anzahl N	Grenz-wert	Einzel-Entsch.	Entsch.
Einfluss des Deckschichtmaterials	G2_A-G2_B	$X \rightarrow Y$	0,0028	271	1,970	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	0,0286			Nein	
Einfluss der Geschwindigkeit auf Asphaltoberflächen	G1-1_40 - G1-1_60	$X \rightarrow Y$	0,0888	138	1,980	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	0,0761			Nein	
	G1-1_60 - G1-1_80	$X \rightarrow Y$	0,1363	172	1,974	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	0,1753			Nein	
	G1-1_40 - G1-1_80	$X \rightarrow Y$	0,0224	152	1,975	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	0,0727			Nein	
Einfluss der Geschwindigkeit auf Betonoberflächen	G1-2_40 - G1-2_60	$X \rightarrow Y$	0,0622	8	2,447	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	0,0550			Nein	
	G1-2_60 - G1-2_80	$X \rightarrow Y$	0,1198	24	2,074	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	0,1140			Nein	
	G1-2_40 - G1-2_80	$X \rightarrow Y$	0,1932	24	2,074	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	0,1719			Nein	
Einfluss der Sollmessgeschwindigkeit	G1_40 - G1_60	$X \rightarrow Y$	0,1329	290	1,968	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	0,3056			Nein	
	G1_60 - G1_80	$X \rightarrow Y$	0,1525	355	1,966	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	0,2606			Nein	
	G1_40 - G1_80	$X \rightarrow Y$	0,0335	191	1,973	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	0,1422			Nein	

Einfluss der Textur auf Asphaltoberflächen	G3_alle_o - G3_alle_g	X → Y	0,8029	233	1,971	Nein	Nein
		Y → X	0,8171			Nein	
Einfluss der Geschwindigkeit und der Textur auf Asphaltoberflächen	G3_40_o - G3_40_g	X → Y	0,2198	58	2,008	Nein	Nein
		Y → X	0,2711			Nein	
	G3_60_o - G3_60_g	X → Y	0,4371	79	1,990	Nein	Nein
		Y → X	0,4479			Nein	
	G3_80_o - G3_80_g	X → Y	0,9176	93	1,983	Nein	Nein
		Y → X	0,9275			Nein	
Einfluss der Geschwindigkeit und der Textur auf Betonoberfläche	G4_80_o - G4_80_m	X → Y	0,0890	23	2,080	Nein	Nein
		Y → X	0,1186			Nein	

Funktionswerte und Parameter siehe Anlage A9

Spalte 3: Prüfwerte der T-Verteilung

Spalte 4: Anzahl N

Spalte 5: Schwellenwert $t_{1-\alpha/2, 95\%}$ nach GRAF, HENNIG, STANGE 1966

Die Nullhypothese auf Gleichheit der Geraden H_0 wird verworfen, wenn der Schwellenwert in der fünften Spalte kleiner ist als der Zahlenwert in der dritten Spalte. Danach wurde die Einzelentscheidung in Spalte 6 getroffen und in Spalte 7 vereinheitlicht. Dabei die Entscheidung in Spalte 7 auch unter Berücksichtigung der Prüfgröße und des Schwellenwertes getroffen.

Anlage A11.1	t-Test auf signifikante Abweichung der Zusammenhangsfunktion (proportional)	Blatt 70
---------------------	--	-----------------

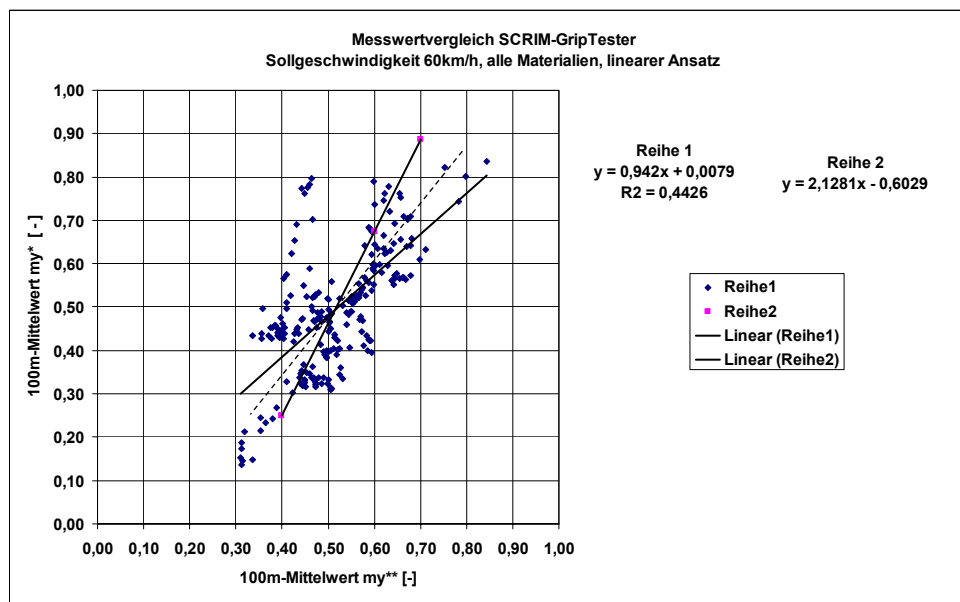
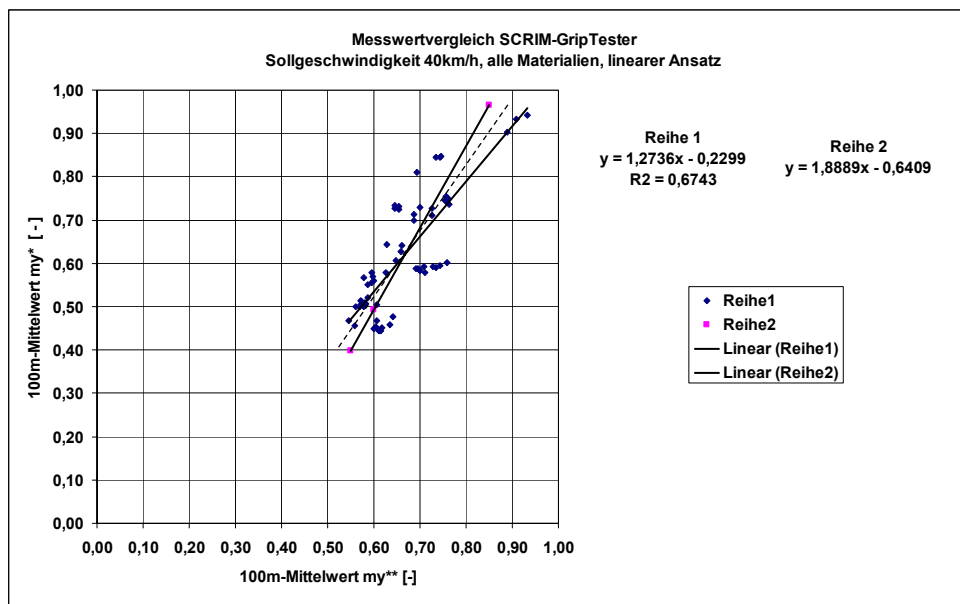
Untersuchungsziel	Vergleich der Klassen	Richtg.	Prüf-wert	Anzahl N	Grenz-wert	Einzel-Entsch.	Entsch.
Einfluss des Deckschicht-materials	G2_A-G2_B	$X \rightarrow Y$	0,6827	271	3,02	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	2,0287			Nein	
Einfluss der Geschwindigkeit auf Asphaltoberflächen	G1-1_40 - G1-1_60	$X \rightarrow Y$	2,5444	138	3,07	Nein	Ja
		$Y \rightarrow X$	11,6627			Ja	
	G1-1_60 - G1-1_80	$X \rightarrow Y$	9,7183	172	3,05	Ja	Ja
		$Y \rightarrow X$	14,7256			Ja	
	G1-1_40 - G1-1_80	$X \rightarrow Y$	3,6842	152	3,06	Ja	Ja
		$Y \rightarrow X$	0,5758			Ja	
	G1-2_40 - G1-2_60	$X \rightarrow Y$	29,3320	8	6,94	Ja	Ja
		$Y \rightarrow X$	27,4586			Ja	
Einfluss der Geschwindigkeit auf Betonoberflächen	G1-2_60 - G1-2_80	$X \rightarrow Y$	1,3386	24	3,49	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	1,1448			Nein	
	G1-2_40 - G1-2_80	$X \rightarrow Y$	0,3821	24	3,49	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	1,6275			Nein	
	G1_40 - G1_60	$X \rightarrow Y$	3,0885	290	3,03	Nein	Ja
		$Y \rightarrow X$	36,8891			Ja	

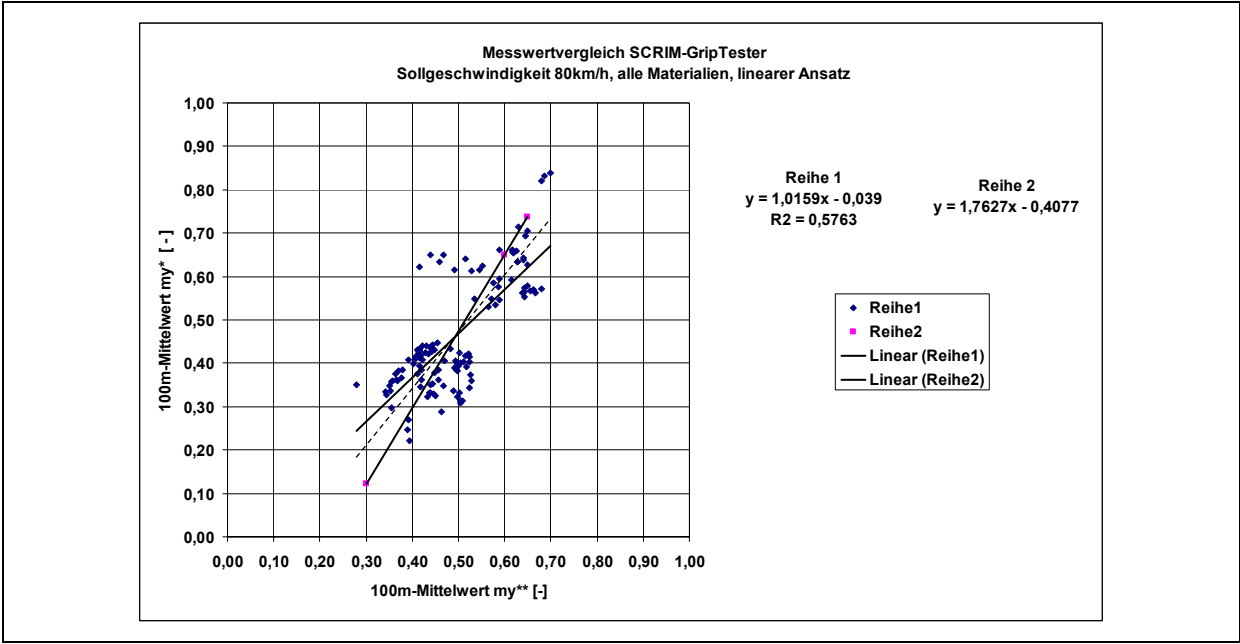
	G1_60 - G1_80	$X \rightarrow Y$	0,6214	355	3,02	Nein	Nein
		$Y \rightarrow X$	1,6676			Nein	
	G1_40 - G1_80	$X \rightarrow Y$	3,2785	191	3,04	Nein	Ja
		$Y \rightarrow X$	33,9424			Ja	
Einfluss der Textur auf Asphaltoberflächen	G3_alle_o - G3_alle_g	$X \rightarrow Y$	46,6871	233	3,03	Ja	Ja
		$Y \rightarrow X$	45,6174			Ja	
Einfluss der Geschwindigkeit und der Textur auf Asphaltoberflächen	G3_40_o - G3_40_g	$X \rightarrow Y$	0,9822	58	3,17	Nein	Ja
		$Y \rightarrow X$	4,1540			Ja	
	G3_60_o - G3_60_g	$X \rightarrow Y$	8,4565	79	3,12	Ja	Ja
		$Y \rightarrow X$	2,2499			Nein	
	G3_80_o - G3_80_g	$X \rightarrow Y$	51,9982	93	3,10	Ja	Ja
		$Y \rightarrow X$	50,4291			Ja	
Einfluss der Geschwindigkeit und der Textur auf Betonoberfläche	G4_80_o - G4_80_m	$X \rightarrow Y$	3,8797	23	3,52	Ja	Ja
		$Y \rightarrow X$	2,8676			Nein	

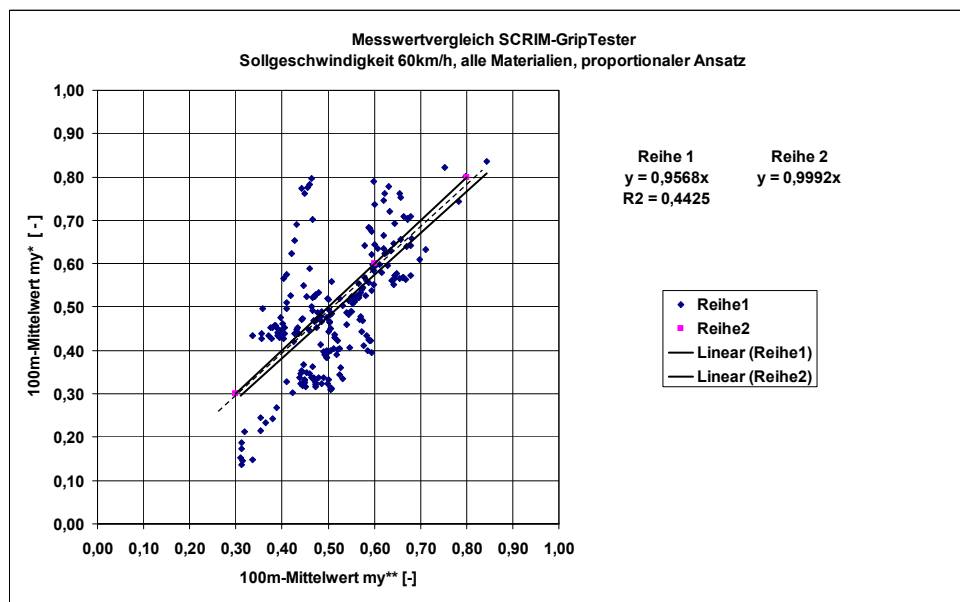
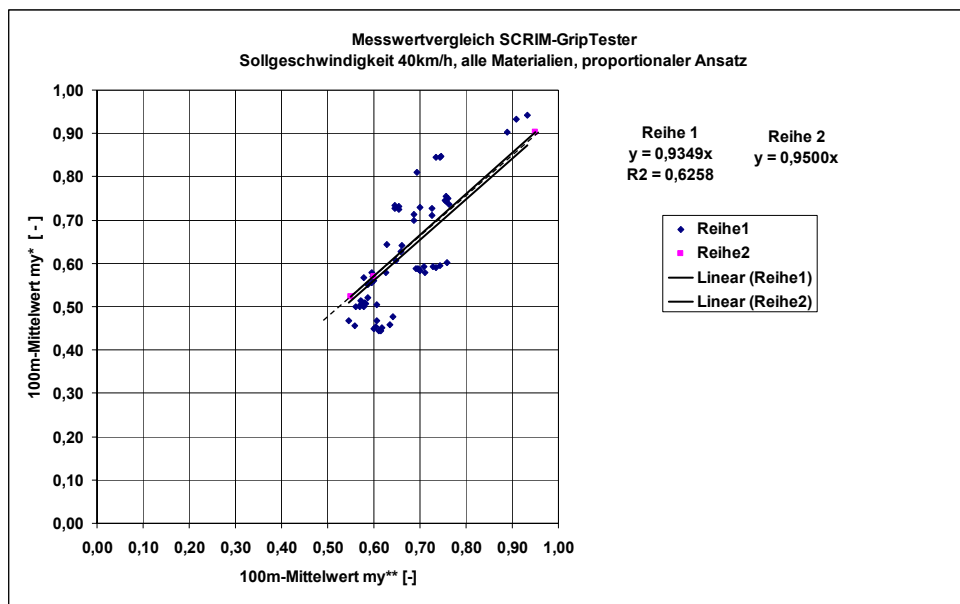
Funktionswerte und Parameter siehe Anlage A9

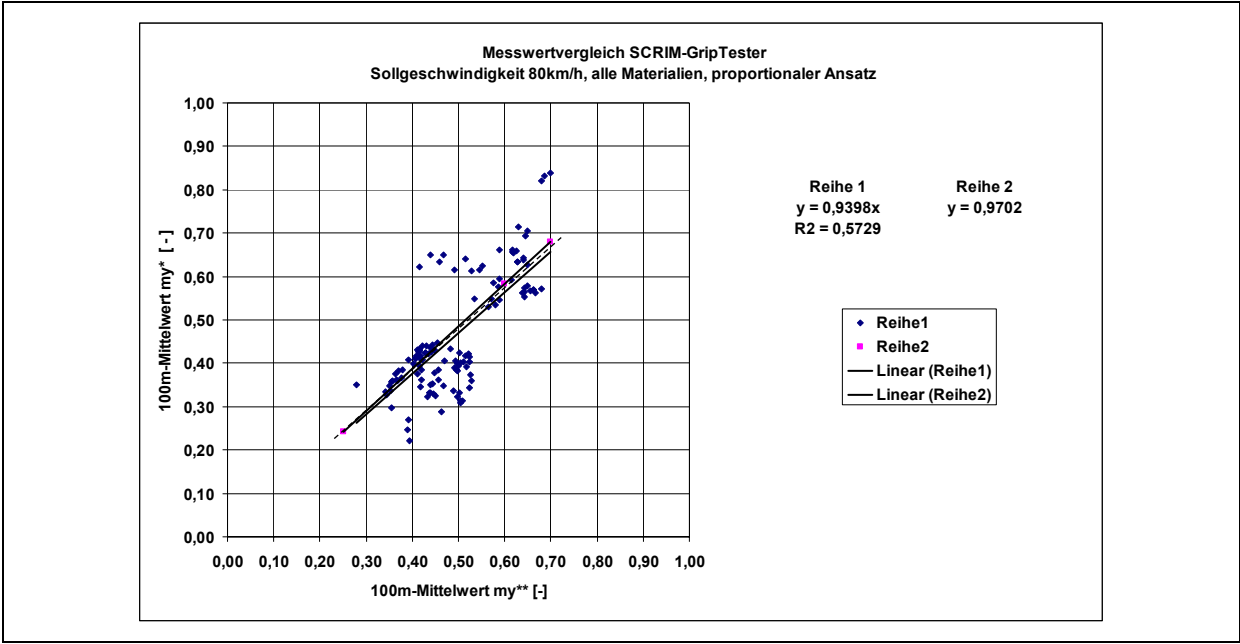
Spalte 3: Prüfwerte der F Verteilung, Spalte 4: Anzahl N, Spalte 5: Schwellenwert $F_{1-\alpha, 95\%}$ nach GRAF, HENNIG, STANGE 1966; Die Nullhypothese auf Gleichheit der Geraden H_0 wird verworfen, wenn der Schwellenwert in der fünften Spalte kleiner ist als der Zahlenwert in der dritten Spalte. Danach wurde die Einzelentscheidung in Spalte 6 getroffen und in Spalte 7 vereinheitlicht. Dabei die Entscheidung in Spalte 7 auch unter Berücksichtigung der Prüfgröße und des Schwellenwertes getroffen.

Anlage A11.2	F-Test auf signifikante Abweichung der Zusammenhangsfunktion (linear)	Blatt 72
---------------------	--	-----------------









Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, linearer Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,60	0,61	0,58	0,56	0,55
1,5	0,63	0,55	0,58	0,53	0,53	0,51
2	0,59	0,49	0,54	0,46	0,49	0,46
3	0,52	0,38	0,47	0,35	0,42	0,37
3,5	0,49	0,34	0,44	0,30	0,39	0,33
4	0,45	0,27	0,40	0,24	0,35	0,29
4,5	0,42	0,23	0,37	0,19	0,32	0,25
5	0,38	0,17	0,33	0,12	0,28	0,20
Abnahme	0,56	0,44	0,51	0,42	0,46	0,42
Verjähung	0,52	0,38	0,48	0,37	0,43	0,37

Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, proportionaler Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,61	0,61	0,58	0,56	0,56
1,5	0,63	0,56	0,58	0,53	0,53	0,51
2	0,59	0,50	0,54	0,47	0,49	0,46
3	0,52	0,39	0,47	0,37	0,42	0,36
3,5	0,49	0,34	0,44	0,32	0,39	0,32
4	0,45	0,28	0,40	0,26	0,35	0,26
4,5	0,42	0,23	0,37	0,22	0,32	0,22
5	0,38	0,17	0,33	0,16	0,28	0,16
Abnahme	0,56	0,45	0,51	0,43	0,46	0,42
Verjähung	0,52	0,39	0,48	0,38	0,43	0,37

Anlage A13.1	Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester mit Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, Möglichkeit A, geschwindigkeitsabhängige Kalibrierlinie linear und proportional	Blatt 77
--------------	---	----------

Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, linearer Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,73	0,61	0,65	0,56	0,58
1,5	0,63	0,69	0,58	0,61	0,53	0,54
2	0,59	0,64	0,54	0,56	0,49	0,49
3	0,52	0,54	0,47	0,47	0,42	0,40
3,5	0,49	0,50	0,44	0,43	0,39	0,36
4	0,45	0,45	0,40	0,38	0,35	0,30
4,5	0,42	0,41	0,37	0,34	0,32	0,26
5	0,38	0,36	0,33	0,28	0,28	0,21
Abnahme	0,56	0,60	0,51	0,52	0,46	0,45
Verjähung	0,52	0,54	0,48	0,48	0,43	0,41

Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, proportionaler Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,68	0,61	0,64	0,56	0,60
1,5	0,63	0,63	0,58	0,60	0,53	0,55
2	0,59	0,57	0,54	0,54	0,49	0,50
3	0,52	0,47	0,47	0,44	0,42	0,40
3,5	0,49	0,43	0,44	0,39	0,39	0,35
4	0,45	0,37	0,40	0,34	0,35	0,29
4,5	0,42	0,32	0,37	0,29	0,32	0,25
5	0,38	0,26	0,33	0,23	0,28	0,19
Abnahme	0,56	0,53	0,51	0,50	0,46	0,45
Verjähung	0,52	0,47	0,48	0,45	0,43	0,41

Anlage A13.1a	Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester mit Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile (alle Messdaten), Möglichkeit A, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinien, linear und proportional	Blatt 78
---------------	--	----------

Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, linearer Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,64	0,61	0,58	0,56	0,52
1,5	0,63	0,60	0,58	0,54	0,53	0,48
2	0,59	0,56	0,54	0,50	0,49	0,44
3	0,52	0,47	0,47	0,41	0,42	0,35
3,5	0,49	0,44	0,44	0,38	0,39	0,32
4	0,45	0,39	0,40	0,33	0,35	0,27
4,5	0,42	0,36	0,37	0,30	0,32	0,24
5	0,38	0,31	0,33	0,25	0,28	0,19
Abnahme	0,56	0,52	0,51	0,46	0,46	0,40
Verjähung	0,52	0,47	0,48	0,43	0,43	0,37

Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, proportionaler Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,61	0,61	0,57	0,56	0,53
1,5	0,63	0,57	0,58	0,54	0,53	0,49
2	0,59	0,52	0,54	0,49	0,49	0,44
3	0,52	0,43	0,47	0,40	0,42	0,36
3,5	0,49	0,39	0,44	0,36	0,39	0,32
4	0,45	0,34	0,40	0,31	0,35	0,27
4,5	0,42	0,30	0,37	0,27	0,32	0,23
5	0,38	0,25	0,33	0,22	0,28	0,19
Abnahme	0,56	0,48	0,51	0,45	0,46	0,41
Verjähung	0,52	0,43	0,48	0,41	0,43	0,37

Anlage A13.1b	Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester mit Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile (nur Daten mit Geschwindigkeitsangabe), Möglichkeit A, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinie linear und proportional	Blatt 79
---------------	--	----------

Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, linearer Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,64	0,61	0,60	0,56	0,55
1,5	0,63	0,61	0,58	0,57	0,53	0,52
2	0,59	0,57	0,54	0,53	0,49	0,48
3	0,52	0,50	0,47	0,46	0,42	0,41
3,5	0,49	0,47	0,44	0,43	0,39	0,39
4	0,45	0,44	0,40	0,39	0,35	0,35
4,5	0,42	0,41	0,37	0,36	0,32	0,32
5	0,38	0,37	0,33	0,32	0,28	0,28
Abnahme	0,56	0,54	0,51	0,50	0,46	0,45
Verjähung	0,52	0,50	0,48	0,47	0,43	0,42

Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, proportionaler Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,65	0,61	0,60	0,56	0,55
1,5	0,63	0,62	0,58	0,57	0,53	0,52
2	0,59	0,58	0,54	0,53	0,49	0,48
3	0,52	0,51	0,47	0,46	0,42	0,41
3,5	0,49	0,49	0,44	0,44	0,39	0,39
4	0,45	0,45	0,40	0,40	0,35	0,35
4,5	0,42	0,42	0,37	0,37	0,32	0,32
5	0,38	0,38	0,33	0,33	0,28	0,28
Abnahme	0,56	0,55	0,51	0,50	0,46	0,45
Verjähung	0,52	0,51	0,48	0,47	0,43	0,42

Anlage A13.1c	Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester mit Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile (nur Daten mit Geschwindigkeitsangabe paritätisch), Möglichkeit A, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinie, linear und proportional	Blatt 80
---------------	---	----------

Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, linearer Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,60	0,61	0,58	0,56	0,55
1,5	0,63	0,55	0,58	0,53	0,53	0,51
2	0,59	0,48	0,54	0,46	0,49	0,46
3	0,52	0,37	0,47	0,34	0,42	0,37
3,5	0,49	0,31	0,44	0,29	0,39	0,33
4	0,45	0,25	0,40	0,22	0,35	0,28
4,5	0,42	0,20	0,37	0,17	0,32	0,24
5	0,38	0,13	0,33	0,11	0,28	0,19
Abnahme	0,56	0,43	0,51	0,41	0,46	0,42
Verjähung	0,52	0,37	0,48	0,36	0,43	0,38

Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, proportionaler Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,60	0,61	0,55	0,56	0,53
1,5	0,63	0,57	0,58	0,52	0,53	0,50
2	0,59	0,54	0,54	0,49	0,49	0,46
3	0,52	0,47	0,47	0,42	0,42	0,40
3,5	0,49	0,45	0,44	0,40	0,39	0,37
4	0,45	0,41	0,40	0,36	0,35	0,33
4,5	0,42	0,38	0,37	0,33	0,32	0,30
5	0,38	0,35	0,33	0,30	0,28	0,26
Abnahme	0,56	0,51	0,51	0,46	0,46	0,43
Verjähung	0,52	0,47	0,48	0,43	0,43	0,41

Anlage A13.2	Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, Möglichkeit B, geschwindigkeitsspezifische Kalibrierlinien linear und proportional	Blatt 81
--------------	---	----------

Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechteile, linearer Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,73	0,61	0,66	0,56	0,59
1,5	0,63	0,69	0,58	0,62	0,53	0,54
2	0,59	0,63	0,54	0,56	0,49	0,49
3	0,52	0,53	0,47	0,46	0,42	0,39
3,5	0,49	0,49	0,44	0,42	0,39	0,35
4	0,45	0,43	0,40	0,36	0,35	0,29
4,5	0,42	0,39	0,37	0,32	0,32	0,25
5	0,38	0,33	0,33	0,26	0,28	0,19
Abnahme	0,56	0,59	0,51	0,52	0,46	0,44
Verjähung	0,52	0,53	0,48	0,47	0,43	0,40

Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechteile, proportionaler Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,67	0,61	0,62	0,56	0,57
1,5	0,63	0,64	0,58	0,59	0,53	0,54
2	0,59	0,60	0,54	0,55	0,49	0,50
3	0,52	0,53	0,47	0,48	0,42	0,43
3,5	0,49	0,50	0,44	0,45	0,39	0,40
4	0,45	0,46	0,40	0,41	0,35	0,36
4,5	0,42	0,43	0,37	0,38	0,32	0,33
5	0,38	0,39	0,33	0,34	0,28	0,29
Abnahme	0,56	0,57	0,51	0,52	0,46	0,47
Verjähung	0,52	0,53	0,48	0,49	0,43	0,44

Anlage A13.2a	Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester ohne Berücksichtigung gleicher Schlechteile (alle Messdaten), Möglichkeit B, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinie, linear und proportional	Blatt 82
---------------	---	----------

Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, linearer Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,64	0,61	0,58	0,56	0,52
1,5	0,63	0,60	0,58	0,54	0,53	0,48
2	0,59	0,56	0,54	0,50	0,49	0,44
3	0,52	0,47	0,47	0,41	0,42	0,35
3,5	0,49	0,44	0,44	0,38	0,39	0,32
4	0,45	0,39	0,40	0,33	0,35	0,27
4,5	0,42	0,35	0,37	0,29	0,32	0,23
5	0,38	0,30	0,33	0,25	0,28	0,19
Abnahme	0,56	0,52	0,51	0,46	0,46	0,40
Verjähung	0,52	0,47	0,48	0,42	0,43	0,36

Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, proportionaler Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,60	0,61	0,56	0,56	0,51
1,5	0,63	0,58	0,58	0,53	0,53	0,48
2	0,59	0,54	0,54	0,49	0,49	0,45
3	0,52	0,48	0,47	0,43	0,42	0,38
3,5	0,49	0,45	0,44	0,40	0,39	0,36
4	0,45	0,41	0,40	0,37	0,35	0,32
4,5	0,42	0,38	0,37	0,34	0,32	0,29
5	0,38	0,35	0,33	0,30	0,28	0,26
Abnahme	0,56	0,51	0,51	0,47	0,46	0,42
Verjähung	0,52	0,48	0,48	0,44	0,43	0,39

Anlage A13.2b	Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile(Daten mit Geschwindigkeitsangabe), Möglichkeit B, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinie linear und proportional	Blatt 83
---------------	--	----------

Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, linearer Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,64	0,61	0,60	0,56	0,55
1,5	0,63	0,61	0,58	0,57	0,53	0,52
2	0,59	0,58	0,54	0,53	0,49	0,48
3	0,52	0,51	0,47	0,46	0,42	0,42
3,5	0,49	0,48	0,44	0,44	0,39	0,39
4	0,45	0,45	0,40	0,40	0,35	0,35
4,5	0,42	0,42	0,37	0,37	0,32	0,33
5	0,38	0,38	0,33	0,34	0,28	0,29
Abnahme	0,56	0,55	0,51	0,50	0,46	0,46
Verjähung	0,52	0,51	0,48	0,47	0,43	0,43

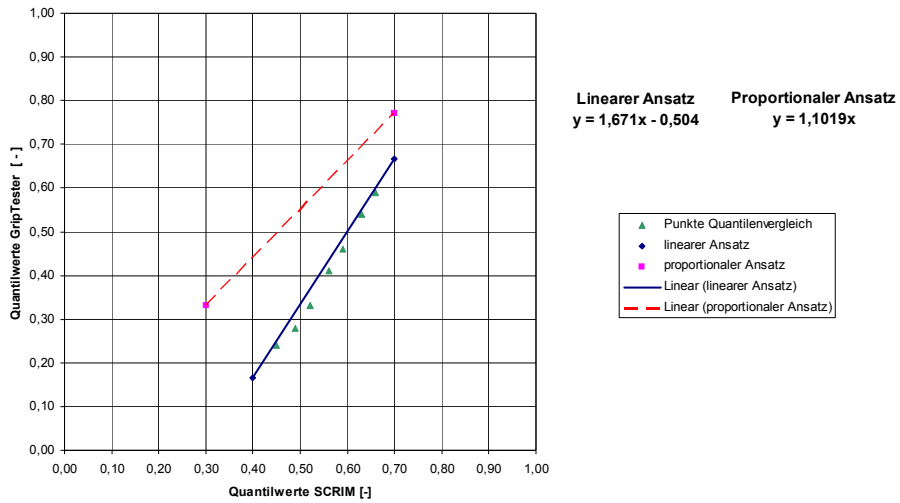
Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, proportionaler Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,65	0,61	0,60	0,56	0,55
1,5	0,63	0,62	0,58	0,57	0,53	0,52
2	0,59	0,58	0,54	0,53	0,49	0,48
3	0,52	0,51	0,47	0,46	0,42	0,41
3,5	0,49	0,48	0,44	0,43	0,39	0,38
4	0,45	0,44	0,40	0,39	0,35	0,34
4,5	0,42	0,41	0,37	0,36	0,32	0,31
5	0,38	0,37	0,33	0,32	0,28	0,27
Abnahme	0,56	0,55	0,51	0,50	0,46	0,45
Verjähung	0,52	0,51	0,48	0,47	0,43	0,42

Anlage A13.2c	<p>Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile (Daten mit Geschwindigkeitsangabe paritätisch), Möglichkeit B, geschwindigkeitsunabhängige Kalibrierlinie, linear und proportional</p>	Blatt 84
---------------	--	----------

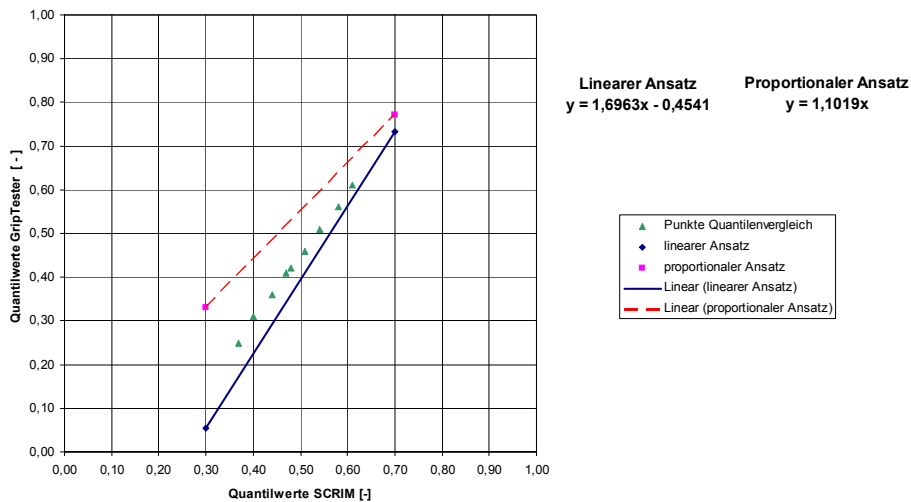
Anforderungswerte für den GripTester TU Darmstadt						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	Perzentilwerte der Anforderungs- werte SCRIM nach M Bgriff %	Abgeleitete Grenzwerte μGT aus BWH der TUD	Perzentilwerte der Anforderungs- werte SCRIM nach M Bgriff %	Abgeleitete Grenzwerte μGT aus BWH der TUD	Perzentilwerte der Anforderungs- werte SCRIM nach M Bgriff %	Abgeleitete Grenzwerte μGT aus BWH der TUD
1	55	0,59	70	0,61	75	0,58
1,5	41	0,54	57	0,56	63	0,54
2	23	0,46	39	0,51	46	0,49
3	5	0,33	14	0,41	19	0,41
3,5	2	0,28	7	0,36	11	0,37
4	1	0,24	3	0,31	5	0,32
4,5	0	<0,24	1	0,25	2	0,27
5	0	<0,24	0	<0,25	1	0,24
Abnahme	13	0,41	26	0,46	33	0,45
Verjähung	5	0,33	16	0,42	22	0,42

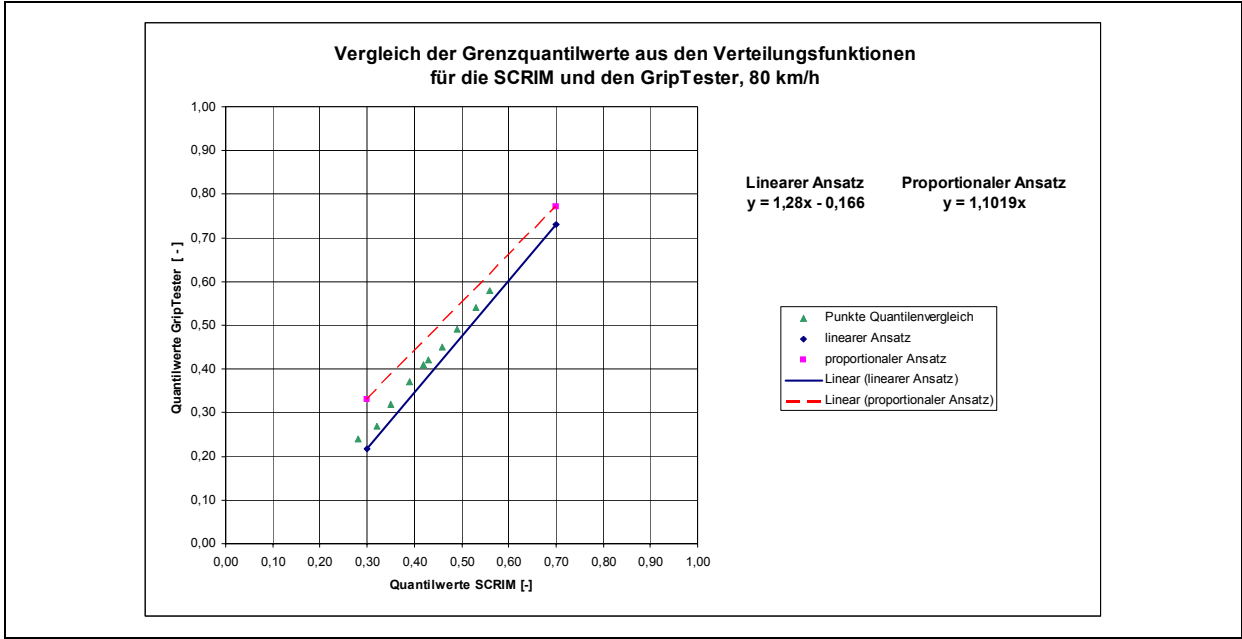
Anlage A14	Anforderungswerte für den GripTester abgeleitet aus dem vorläufigen Bewertungshintergrund der Technischen Universität Darmstadt	Blatt 85
------------	---	----------

Vergleich der Grenzquantilwerte aus den Verteilungsfunktionen
für die SCRIM und den GripTester, 40 km/h



Vergleich der Grenzquantilwerte aus den Verteilungsfunktionen
für die SCRIM und den GripTester, 60 km/h







Sollmessgeschwindigkeit 80 km/h			
Linearer Zusammenhang bei Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile			
Anforderungswerte SCRIM	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Alte Bundesländer“	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Alte Bundesländer – Asphalt“	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Gesamt“
0,56	0,55	0,55	0,55
0,53	0,51	0,51	0,51
0,49	0,46	0,46	0,46
0,46	0,42	0,42	0,42
0,43	0,39	0,38	0,39
0,42	0,37	0,37	0,37
0,39	0,34	0,34	0,34
0,35	0,29	0,29	0,29
0,32	0,25	0,25	0,25
0,28	0,20	0,20	0,20

Anlage A16	Übertragene Quantilwerte auf den GripTester auf der Grundlage des Bewertungshintergrundes der SCRIM nach KLINGHAMMER/ GAST, 80 km/h, Möglichkeit A und Möglichkeit B	Blatt 88
------------	---	----------

Proportionaler Zusammenhang bei Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile			
Anforderungswerte SCRIM	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Alte Bundesländer“	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Alte Bundesländer – Asphalt“	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Gesamt“
0,56	0,57	0,57	0,56
0,53	0,53	0,53	0,52
0,49	0,48	0,48	0,47
0,46	0,43	0,44	0,43
0,43	0,39	0,40	0,39
0,42	0,38	0,38	0,37
0,39	0,34	0,34	0,33
0,35	0,28	0,29	0,28
0,32	0,24	0,25	0,24
0,28	0,19	0,19	0,18

Anlage A16	Übertragene Quantilwerte auf den GripTester auf der Grundlage des Bewertungshintergrundes der SCRIM nach KLINGHAMMER/ GAST, 80 km/h, Möglichkeit A und Möglichkeit B	Blatt 89
------------	---	----------

Linearer Zusammenhang ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile			
Anforderungswerte SCRIM	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Alte Bundesländer“	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Alte Bundesländer - Asphalt“	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Gesamt“
0,56	0,55	0,55	0,55
0,53	0,51	0,51	0,51
0,49	0,46	0,46	0,46
0,46	0,42	0,42	0,42
0,43	0,38	0,38	0,38
0,42	0,37	0,37	0,37
0,39	0,33	0,33	0,33
0,35	0,28	0,28	0,28
0,32	0,24	0,24	0,24
0,28	0,19	0,19	0,19

Anlage A16	Übertragene Quantilwerte auf den GripTester auf der Grundlage des Bewertungshintergrundes der SCRIM nach KLINGHAMMER/ GAST, 80 km/h, Möglichkeit A und Möglichkeit B	Blatt 90
-------------------	---	-----------------

Proportionaler Zusammenhang ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile			
Anforderungswerte SCRIM	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Alte Bundesländer“	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Alte Bundesländer - Asphalt“	Anforderungswerte f. den GripTester nach BW „Gesamt“
0,56	0,53	0,53	0,53
0,53	0,50	0,50	0,50
0,49	0,46	0,46	0,46
0,46	0,43	0,43	0,43
0,43	0,41	0,41	0,41
0,42	0,40	0,40	0,40
0,39	0,37	0,37	0,37
0,35	0,33	0,33	0,33
0,32	0,30	0,30	0,30
0,28	0,26	0,26	0,26

Anlage A16	Übertragene Quantilwerte auf den GripTester auf der Grundlage des Bewertungshintergrundes der SCRIM nach KLINGHAMMER/ GAST, 80 km/h, Möglichkeit A und Möglichkeit B	Blatt 91
-------------------	---	-----------------

Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechteile, linearer Ansatz			
	40 km/h	60 km/h	80 km/h
Grenzwert	GripTester	GripTester	GripTester
1	0,73	0,65	0,58
1,5	0,69	0,61	0,54
2	0,64	0,56	0,49
3	0,54	0,47	0,40
3,5	0,50	0,43	0,36
4	0,45	0,38	0,30
4,5	0,41	0,34	0,26
5	0,36	0,28	0,21
Abnahme	0,60	0,52	0,45
Verjähung	0,54	0,48	0,41
Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechteile, proportionaler Ansatz			
	40 km/h	60 km/h	80 km/h
Grenzwert	GripTester	GripTester	GripTester
1	0,68	0,64	0,60
1,5	0,63	0,61	0,55
2	0,57	0,54	0,50
3	0,47	0,44	0,40
3,5	0,43	0,39	0,35
4	0,37	0,34	0,29
4,5	0,32	0,29	0,26
5	0,26	0,23	0,19
Abnahme	0,53	0,50	0,45
Verjähung	0,47	0,45	0,40

Übertragung der Anforderungswerte unter Berücksichtigung gleicher Schlechteile, linearer Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,90	0,61	0,82	0,56	0,75
1,5	0,63	0,86	0,58	0,78	0,53	0,71
2	0,59	0,81	0,54	0,73	0,49	0,66
3	0,52	0,71	0,47	0,64	0,42	0,57
3,5	0,49	0,67	0,44	0,60	0,39	0,53
4	0,45	0,62	0,40	0,55	0,35	0,47
4,5	0,42	0,57	0,37	0,51	0,32	0,43
5	0,38	0,53	0,33	0,45	0,28	0,38
Abnahme	0,56	0,77	0,51	0,69	0,46	0,62
Verjähung	0,52	0,71	0,48	0,65	0,43	0,58

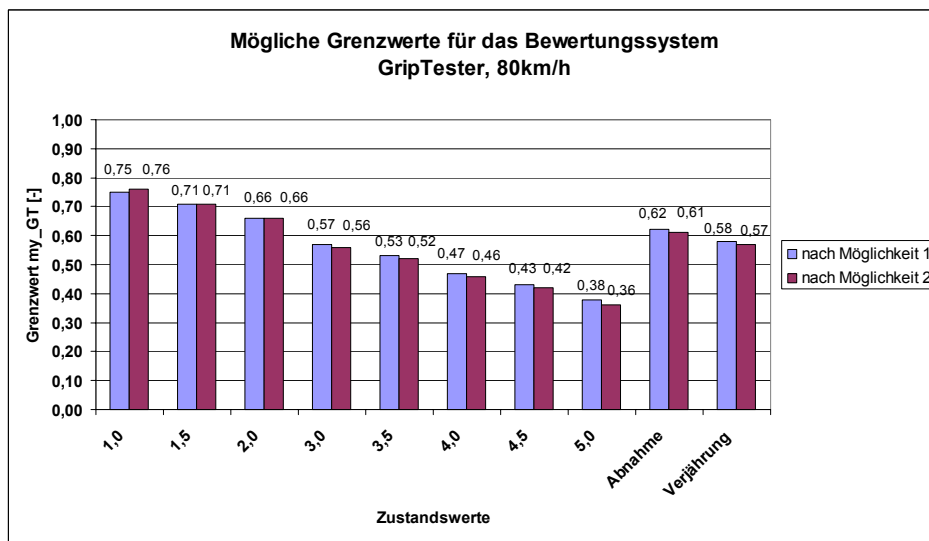
Anlage A17.1a	Bewertungssystem GripTester, nur linearer Ansatz, Möglichkeit A und Sicherheitszuschlag	Blatt 93
---------------	---	----------

Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, linearer Ansatz			
	40 km/h	60 km/h	80 km/h
Grenzwert	GripTester	GripTester	GripTester
1	0,73	0,66	0,59
1,5	0,69	0,62	0,54
2	0,63	0,56	0,49
3	0,53	0,46	0,39
3,5	0,49	0,42	0,35
4	0,43	0,36	0,29
4,5	0,39	0,32	0,25
5	0,33	0,26	0,19
Abnahme	0,59	0,52	0,44
Verjäh rung	0,53	0,47	0,40
Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, proportionalen Ansatz			
	40 km/h	60 km/h	80 km/h
Grenzwert	GripTester	GripTester	GripTester
1	0,67	0,62	0,57
1,5	0,64	0,59	0,54
2	0,60	0,55	0,50
3	0,53	0,48	0,43
3,5	0,50	0,45	0,40
4	0,46	0,41	0,36
4,5	0,43	0,38	0,33
5	0,39	0,34	0,29
Abnahme	0,57	0,52	0,47
Verjäh rung	0,53	0,39	0,44

Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechteile, linearer Ansatz			
	40 km/h	60 km/h	80 km/h
Grenzwert	GripTester	GripTester	GripTester
1	0,73	0,66	0,59
1,5	0,69	0,62	0,54
2	0,63	0,56	0,49
3	0,53	0,46	0,39
3,5	0,49	0,42	0,35
4	0,43	0,36	0,29
4,5	0,39	0,32	0,25
5	0,33	0,26	0,19
Abnahme	0,59	0,52	0,44
Verjähung	0,53	0,47	0,40
Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechteile, proportionalen Ansatz			
	40 km/h	60 km/h	80 km/h
Grenzwert	GripTester	GripTester	GripTester
1	0,67	0,62	0,57
1,5	0,64	0,59	0,54
2	0,60	0,55	0,50
3	0,53	0,48	0,43
3,5	0,50	0,45	0,40
4	0,46	0,41	0,36
4,5	0,43	0,38	0,33
5	0,39	0,34	0,29
Abnahme	0,57	0,52	0,47
Verjähung	0,53	0,39	0,44

Übertragung der Anforderungswerte ohne Berücksichtigung gleicher Schlechtanteile, linearer Ansatz						
	40 km/h		60 km/h		80 km/h	
Grenzwert	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester	SCRIM	GripTester
1	0,66	0,90	0,61	0,83	0,56	0,76
1,5	0,63	0,86	0,58	0,79	0,53	0,71
2	0,59	0,80	0,54	0,73	0,49	0,66
3	0,52	0,70	0,47	0,63	0,42	0,56
3,5	0,49	0,66	0,44	0,59	0,39	0,52
4	0,45	0,60	0,40	0,53	0,35	0,46
4,5	0,42	0,56	0,37	0,49	0,32	0,42
5	0,38	0,50	0,33	0,43	0,28	0,36
Abnahme	0,56	0,76	0,51	0,69	0,46	0,61
Verjähung	0,52	0,70	0,48	0,64	0,43	0,57

Anlage A17.2a	Gegenüberstellung der Anforderungswerte für SCRIM und GripTester Möglichkeit B	Blatt 96
---------------	---	----------



Möglichkeit A entspricht Möglichkeit 1

Möglichkeit B entspricht Möglichkeit 2



Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet und bisher keinen Promotionsversuch unternommen habe.

Jena, Mai 2009



Wissenschaftlicher Lebenslauf

Peter Weidich

27.12.1970	geboren in Jena
Juni 1989	Abitur
1992 – 1998	Studium Bauingenieurwesen an der Bauhaus-Universität Weimar
2000 – 2005	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Verkehr, Fachgebiet Straßenwesen mit Versuchsanstalt der Technischen Universität Darmstadt